



Performance de la estación VLBI, AGGO,  
en la determinación de los EOP;  
situación actual y futura.

Facundo Nahuel Barrera

Tesis de Grado en Geofísica

Directora: Dra. Maria Eugenia Gomez

Co-Directora: Geof. Micaela Alejandra Carbonetti

Junio de 2023

Firma del tribunal examinador:

Dra. Maria Eugenia Gomez

Dra. Laura Fernandez

Dra. María Silvina De Biasi

# Agradecimientos

A la Universidad Nacional de La Plata, especialmente a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, por brindarme una formación de calidad.

Al Instituto Geográfico Nacional de Argentina por permitirme utilizar parte del tiempo laboral en la realización de este trabajo y por formarme en el área.

A mis directoras, Euge y Mica, por la paciencia y el conocimiento transferido durante todo este último tiempo.

A mi familia, especialmente a mis padres por haberme apoyado durante todos estos años. Sin su gran aporte nada de esto hubiera sido posible.

A mis amigos por el aliento y el apoyo de siempre. A cada uno de ellos que ha hecho que el estudio sea más llevadero y que la carrera sea una experiencia inolvidable.

Finalmente, a cada persona que ha preguntado, preocupado e interesado en mí durante todos estos años.

A todos ellos,

GRACIAS.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Sistemas de Referencia geodésicos</b>	<b>3</b>
2.1. Marcos y sistemas de referencia . . . . .	3
2.1.1. Sistema de referencia celeste . . . . .	3
2.1.2. Sistema de referencia terrestre . . . . .	4
2.1.3. Marcos de referencia geodésicos . . . . .	5
2.2. Cambios en la orientación de la Tierra . . . . .	5
2.2.1. Rotación terrestre . . . . .	5
2.2.2. Precesión y nutación . . . . .	6
2.2.3. Movimiento del polo . . . . .	8
2.3. Descripción de los parámetros de orientación terrestre . . . . .	8
2.3.1. Definiciones útiles vinculadas a los sistemas de referencia geodésicos . . . . .	8
2.3.2. Cuantificación de la rotación . . . . .	9
2.3.3. Cuantificación de la precesión y nutación . . . . .	9
2.3.4. Cuantificación del movimiento del polo . . . . .	11
2.4. Transformación entre sistemas de referencia celestes y terrestres . . . . .	11
<b>3. Principios de la técnica VLBI</b>	<b>13</b>
3.1. Principio de funcionamiento . . . . .	13
3.2. Radiofuentes . . . . .	14
3.3. Instrumental . . . . .	15
3.3.1. Sesiones VLBI . . . . .	16
3.4. Correlación . . . . .	16
3.5. Estructura de datos vgosDB . . . . .	17
3.6. Precisión en las observaciones VLBI . . . . .	17
3.7. Tecnologías VLBI: VGOS vs Legacy . . . . .	18
3.8. Coordinación global de las observaciones VLBI . . . . .	19
3.9. Análisis de datos VLBI y determinación de EOP . . . . .	20
3.9.1. Flujo de procesamiento . . . . .	20
3.9.2. Cálculo del retardo a priori o teórico . . . . .	22

3.9.3. Reducción de las observaciones . . . . .	26
3.10. Soluciones diarias y soluciones globales . . . . .	31
3.10.1. Soluciones diarias . . . . .	31
3.10.2. Soluciones globales . . . . .	32
3.11. Combinación con otras técnicas geodésicas . . . . .	32
<b>4. VLBI en Argentina y el IGN</b>	<b>34</b>
4.1. Distribución de antenas VLBI en el mundo . . . . .	34
4.2. Situación actual de VLBI en América del Sur . . . . .	35
4.3. VLBI en el Instituto Geográfico Nacional de Argentina . . . . .	35
4.4. VieVS: Software de análisis VLBI utilizado en el IGN . . . . .	36
4.5. Modelos utilizados en el IGN . . . . .	37
4.5.1. TRF: ITRF2014 . . . . .	37
4.5.2. CRF: ICRF3 . . . . .	38
4.5.3. A priori EOP: IERS C04 . . . . .	38
4.5.4. Modelo de alta frecuencia de EOP: Desai & Sibois . . . . .	39
4.5.5. Modelo de carga debido a mareas oceánicas . . . . .	39
4.5.6. Modelo de marea polar . . . . .	40
4.5.7. Modelo de carga atmosférica . . . . .	40
4.5.8. Modelo de precesión y nutación: IAU2006/2000A . . . . .	40
4.5.9. Función de mapeo: Vienna Mapping Function 3 . . . . .	41
4.5.10. Efemérides: DE421 . . . . .	41
4.5.11. Ionósfera . . . . .	42
4.5.12. Modelo para las mareas terrestres . . . . .	42
4.5.13. Correcciones de la antena . . . . .	42
4.6. Comparación con otros centros . . . . .	42
4.6.1. Objetivo . . . . .	42
4.6.2. Selección de centros . . . . .	43
4.7. Resultado de los análisis de diferentes centros . . . . .	44
4.7.1. Análisis de las diferencias entre los centros y el IERS . . . . .	52
4.7.2. Análisis de las diferencias entre los centros . . . . .	53
4.8. Presencia del efecto del FCN en los datos analizados . . . . .	55
4.9. Conclusión de la comparación . . . . .	56
<b>5. TIGO y AGGO en la determinación de EOP</b>	<b>57</b>
5.1. Motivación del análisis . . . . .	57
5.2. Selección de sesiones . . . . .	57
5.3. Errores en la estimación . . . . .	60
5.4. Análisis sobre la influencia diferentes aspectos de la red de observación sobre la desviación estándar . . . . .	63

5.4.1.	Desviación estándar en función de la cantidad de observaciones . . . . .	65
5.4.2.	Desviación estándar en función de líneas de base con orientación Este-Oeste . .	69
5.4.3.	Desviación estándar en función de líneas de base Norte-Sur . . . . .	73
5.4.4.	Desviación estándar en función de la distribución homogénea de antenas . . . .	76
5.5.	Comparación entre factores . . . . .	80
5.6.	Conclusión . . . . .	81
<b>6.</b>	<b>Simulación y análisis de impacto de AGGO como VGOS</b>	<b>84</b>
6.1.	Motivación del análisis . . . . .	84
6.2.	Software utilizado . . . . .	84
6.3.	Simulación de sesiones VGOS . . . . .	85
6.4.	Preparación de catálogos y estaciones seleccionadas . . . . .	85
6.5.	Configuración del software . . . . .	87
6.6.	Resultados de la simulación . . . . .	88
<b>7.</b>	<b>Conclusión y perspectivas</b>	<b>91</b>
<b>A.</b>	<b>Sesiones seleccionadas</b>	<b>93</b>
<b>B.</b>	<b>Estimación de la media y de la desviación estándar para diferencias de variables.</b>	<b>95</b>
	<b>Referencias</b>	<b>102</b>

# Índice de figuras

2.1. Esquema de movimiento precesional y nutacional terrestre (Torge, 2001) . . . . .	6
2.2. Esquema de fuerzas actuantes en los sistemas Luna-Tierra o Sol-Tierra. . . . .	7
2.3. Esquema del movimiento del polo (Torge, 2001). . . . .	8
2.4. Descripción de ángulos involucrados en la nutación y precesión (Capitaine, 2000). . . . .	10
2.5. Coordenadas del CIP , $d$ y $E$ , y el CIO, $\sigma$ (Capitaine, 2009) . . . . .	10
2.6. Representación de ángulos involucrados en la transformación entre GCRS e ITRS. . . . .	11
3.1. Geometría de la técnica VLBI. . . . .	13
3.2. Esquema sobre el cálculo de los parámetros provenientes de la observación VLBI. . . . .	20
3.3. Esquema de fuerzas actuantes sobre la Tierra involucradas en las mareas . . . . .	24
3.4. Esquema de antena parabólica y sus desplazamientos por deformación. . . . .	30
3.5. Esquema de antenas con desviación del eje. . . . .	31
4.1. Red de estaciones activas en el 2022. . . . .	34
4.2. Flujo de trabajo de VieVS . . . . .	37
4.3. Estimaciones de $x_p$ hecha por cada centro y sus diferencias con el IERS . . . . .	47
4.4. Estimaciones de $y_p$ hecha por cada centro y sus diferencias con el IERS . . . . .	48
4.5. Estimaciones de UT1-UTC hecha por cada centro y sus diferencias con el IERS . . . . .	49
4.6. Estimaciones de $dX$ hecha por cada centro y sus diferencias con el IERS . . . . .	50
4.7. Estimaciones de $dY$ hecha por cada centro y sus diferencias con el IERS . . . . .	51
4.8. Modelo de Lambert y estimaciones del IGN para $dX$ y $dY$ . . . . .	55
5.1. Sesiones R1/R4 que incluyen a TIGO. . . . .	58
5.2. Sesiones R1/R4 seleccionadas en el período donde AGGO ni TIGO han participado. . . . .	59
5.3. Sesiones R1/R4 que incluyen a AGGO. . . . .	59
5.4. Desviación estándar en la estimación de cada EOP para los 3 períodos seleccionados en función del tiempo. . . . .	61
5.5. Antenas participantes en el período “Con TIGO”. . . . .	64
5.6. Antenas participantes en el período “Intermedio”. . . . .	64
5.7. Antenas participantes en el período “Con AGGO”. . . . .	65
5.8. Gráfico de barras de cantidad de observaciones por sesión en función del desvío que arroja el análisis de dicha sesión. . . . .	66
5.9. Gráficos de desviación estándar vs. número de observaciones . . . . .	67

5.10. Descomposición de línea de base en orientación N-S y E-O. . . . .	69
5.11. Gráfico de barras del promedio de la longitud E-O de las líneas de base en cada sesión en función del desvío que arroja el análisis de dicha sesión . . . . .	70
5.12. Gráficos de desviación estándar versus Longitud E-O de las sesiones . . . . .	71
5.13. Gráfico de barras del promedio de la longitud N-S de las líneas de base en cada sesión en función del desvío que arroja el análisis de dicha sesión . . . . .	74
5.14. Gráficos de desviación estándar vs. Longitud N-S de las sesiones . . . . .	75
5.15. Ejemplos de distribuciones de antenas y sus energías logarítmica. . . . .	78
5.16. Gráficos de desviación estándar vs. Energía logarítmica. . . . .	79
6.1. Antenas con tecnología VGOS durante el 2022. . . . .	85
6.2. Mapa de radiofuentes utilizadas durante la simulación. . . . .	86
6.3. Mapas de antenas participantes en cada simulación. . . . .	87

# Índice de tablas

4.1. Modelos utilizados por el IGN, GFZ, NMA y BKG. . . . .	44
4.2. Valores máximos de la desviación estándar en la estimación de cada parámetro hecha por los diferentes centros para la época analizada. . . . .	46
4.3. Valores medios en la diferencia de cada centro con el IERS . . . . .	52
4.4. Desviación estándar en las diferencias con el IERS. . . . .	52
4.5. Media de las diferencias del IGN con los demás centros. . . . .	53
4.6. Desviación estándar estimada en las diferencias del IGN con NMA y GFZ. . . . .	54
4.7. Desviación estándar en las diferencias entre NMA y GFZ. . . . .	54
5.1. Promedio y desviación estándar del apartamiento estimado con VieVS a la serie IERS C04 14. . . . .	59
5.2. Valores estadísticos de los desvíos en la estimación de los EOP. . . . .	62
5.3. Coeficientes de las funciones y errores cuadráticos medios en cada ajuste sobre los datos de desvío en función de la cantidad de observaciones. . . . .	68
5.4. Desviación estándar representativa de cada período en función de las observaciones y su variación período tras período. . . . .	68
5.5. Coeficientes de las funciones y errores cuadráticos medios en cada ajuste sobre los datos de desvío en función de la longitud E-O de las sesiones. . . . .	72
5.6. Desviación estándar representativa de cada período en función de la longitud de líneas de base E-O por sesión y su variación período tras período. . . . .	72
5.7. Coeficientes y errores cuadráticos medios en cada ajuste para a los datos de desvío en función de la longitud N-S de las sesiones. . . . .	74
5.8. Desviación estándar representativa de cada período en función de la longitud de líneas de base N-S por sesión y su variación período tras período. . . . .	76
5.9. Errores cuadráticos medios en cada ajuste sobre los datos de desvío en función de la energía logarítmica. . . . .	80
5.10. Pendientes de las rectas del ajuste a la energía. . . . .	80
5.11. Influencia de los parámetros sobre la diferencia AGGO-TIGO . . . . .	81
5.12. Líneas de base con TIGO y AGGO en los períodos considerados. . . . .	81
5.13. Líneas de base hechas por TIGO y AGGO de orientación estrictamente N-S en los períodos considerados. . . . .	82
5.14. Líneas de base hechas por TIGO y AGGO de orientación estrictamente E-O en los períodos considerados. . . . .	82

6.1. Antenas participantes en cada sesión programada. . . . .	86
6.2. Configuración de la simulación y análisis en VieSched++ para una sesión VGOS. . . . .	88
6.3. Repetibilidad y cantidad de observaciones por sesión simulada. . . . .	89
6.4. Errores medios y cantidad de observaciones por sesión simulada. . . . .	90
A.1. Sesiones seleccionadas por período. . . . .	94

# Capítulo 1

## Introducción

En el marco de la Geofísica, la Geodesia es la ciencia que se encarga de la materialización de todos los sistemas de referencia indispensables para georeferenciar las mediciones obtenidas en el estudio de las geociencias. En particular, la interferometría de muy larga línea de base (VLBI), es la única técnica capaz de materializar por sí sola el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS), al mismo tiempo que permite la obtención de los parámetros de orientación terrestre (EOP) y las coordenadas de las estaciones en el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).

Los EOP describen el cambio de orientación de la superficie de la Tierra con respecto a un sistema de referencia fijo en el espacio (Petit y Luzum, 2010). La relevancia de su estimación con alta precisión es fundamental en el estudio del sistema Tierra (Dehant *et al*, 2005), para la realización de los marcos de referencia, para el posicionamiento preciso, la navegación (Altamimi *et al* (2005) y Gambis y Bizouard (2003)) y para la realización de los sistemas de tiempo.

Para la realización del sistema de referencia terrestre pero más aún para la determinación de los EOP, la buena geometría de la red de estaciones VLBI es fundamental, sin embargo, en la realidad la mayor parte de las estaciones se encuentran en el hemisferio norte. Actualmente están operando, en su mayoría, radiotelescopios en banda S/X (llamados Legacy), y tan sólo 9 estaciones poseen una tecnología más moderna bajo el nombre de Sistema de Observación Global VLBI (VGOS), pero solo se encuentran en el hemisferio norte.

Entre los años 2002 y 2014 operó en Chile la estación fundamental denominada Observatorio Geodésico Integrado y Transportable (TIGO) que fue trasladada hacia Argentina en el año 2015, y que desde 2018 en adelante opera bajo el nombre de Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO). Por otra parte, en el hemisferio sur destacan los radiotelescopios ubicados en Sudáfrica (Hartebeesthoek), Australia (Yarragadee, Katherine, Hobart), Nueva Zelanda (Warkworth) y Brasil (Fortaleza). Si bien las antenas mencionados son de tipo Legacy, en el último tiempo la evolución hacia VGOS ha sido importante, de manera que se espera que en un futuro próximo, varios de estos telescopios muden por completo a VGOS y dejen de participar de aquellas sesiones de 24 horas de observación denominadas de Rápida Respuesta 1 o 4 (R1/R4) destinadas a obtener EOP de forma inmediata. Eso tendrá implicancias directas en la participación de telescopios Legacy como es el caso de AGGO.

El objetivo de este trabajo es analizar la contribución de estaciones como TIGO y AGGO en la determinación de los EOP, pero también analizar la posible contribución en el caso de contar con tecnología VGOS en la última estación mencionada. Para esto nos basaremos en estudios previos como los de Hase (2010), Hase y Pedreros (2014), Schartner *et al* (2020) y Gomez y Fernández (2022). En el primero se analiza la importancia de TIGO en la estimación de los parámetros y en los últimos, se apunta al mejoramiento de la distribución de las estaciones en pos de mejoras en la determinación de los EOP.

En este trabajo, analizaremos las soluciones diarias de los EOP obtenidos en distintos períodos, con TIGO, con AGGO y sin ninguna de las dos en funcionamiento. Para esto utilizaremos la base de datos provista por el Servicio Internacional de VLBI para la Geodesia y la Astrometría (IVS) en el formato denominado “Base de Datos del Sistema de Observación Global de VLBI (VgosDB)” y el software de análisis “Software de Satelites y VLBI de Viena (VieVS)” (Böhm *et al*, 2018) desarrollado por la Universidad Tecnológica de Viena. Para el caso del estudio del impacto que tendrían estaciones con tecnología VGOS ubicadas en el hemisferio sur, en particular en Argentina, se utilizará el programa “Software de Programación VLBI de VieVS ( VieSched++)” (Schartner y Böhm, 2019a) que no sólo permite diseñar los programas de observación (o “scheduling”) sino que también permite simular observaciones variando distintos parámetros como la cobertura del cielo, tiempo de observación, cantidad de observaciones, entre otros.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se espera resolver el interrogante sobre la contribución pasada, actual y futura de estaciones en Sudamérica como por ejemplo la de AGGO en la determinación de EOP, ya sea operando en banda S/X o contando con tecnología VGOS. Todas las soluciones que forman parte de esta tesis fueron obtenidas a través de mi trabajo como analista de datos VLBI en el Centro de Procesamiento VLBI del Instituto Geográfico Nacional de Argentina (IGN), actualmente centro asociado del IVS, donde aportamos regularmente con soluciones diarias. Es por esto, que previo al análisis de las soluciones propuestas, realizaremos también un estudio de la performance de este centro.

## Capítulo 2

# Sistemas de Referencia geodésicos

La geodesia es una ciencia avocada a la medición y al mapeo de la superficie terrestre (Helmert, 1980), tanto continental como oceánica. Su definición incluye, también, la determinación del campo de gravedad terrestre ya que este moldea a la superficie a grandes escalas (Torge, 2001). La geodesia tiene entre sus objetivos ofrecer una referencia tanto espacial, como temporal para las mediciones en las geociencias, la astronomía, y la ingeniería.

Los sistemas de referencia geodésicos son una herramienta matemática utilizada para ubicar puntos en el espacio exterior y terrestre donde cada posición dentro de estos sistemas puede ser especificada a través de un conjunto de valores numéricos.

### 2.1. Marcos y sistemas de referencia

Un sistema de referencia es un conjunto de convenciones, constantes y modelos usados por un observador para poder determinar cuantitativamente la posición de un conjunto de objetos, para un tiempo determinado, respecto a puntos, ejes y/o planos coordenados. En particular, un sistema de referencia cartesiano, es definido a través de una terna de ejes coordenados ortogonales. En este caso, dicho conjunto de convenciones involucra el origen, orientación y escala de los ejes, además de su evolución temporal.

Si el observador quiere llevar a cabo la determinación de la posición de un punto en el espacio, deberá materializar el sistema de referencia. Para esto basta con cuantificar las coordenadas de un conjunto de puntos con posiciones conocidas a partir de los cuales pueda medirse cualquier posición de interés. Dicha materialización es denominada Marco de Referencia, definido como la realización del sistema de referencia por medio de coordenadas de puntos fiduciales, con la característica de ser accesibles directamente por observación.

Podemos clasificar a los sistemas de referencia como inerciales o no inerciales. Un sistema de referencia inercial es aquel en donde todo cuerpo, sobre el cual no actúa ninguna fuerza neta, conserva su momento lineal, como es definido por la Primera Ley de Newton (Newton, 1687). En cambio, los sistemas de referencia no inerciales son aquellos donde no se cumple esta última condición.

#### 2.1.1. Sistema de referencia celeste

Dentro de la astronomía, más precisamente en astrometría, uno de los principales temas de interés es determinar las posiciones de los astros, sus distancias al observador y las variaciones de estos parámetros con el tiempo. Por otra parte, el posicionamiento es importante para la determinación de las órbitas de los satélites, como aquellos utilizados por la Telemetría Láser sobre Satélites Artificiales

o sobre la Luna (SLR/LLR), por el Sistema Global de Navegación por Satélites (GNSS) o por la Determinación de Órbita y Radio-posicionamiento Integrado por Satélite (DORIS). Por estas causas es fundamental la existencia de un sistema inercial de referencia celeste.

En 1997, durante la 23<sup>ra</sup> Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (IAU), se oficializó el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS) (Arias *et al*, 1995), de definición cinemática y materializado por las posiciones de cuásares observados en frecuencias de radio con la ayuda de la tecnología VLBI. El primer ICRS definido cumplía con las condiciones especificadas por la recomendaciones del IAU 1991 (Feissel y Mignard, 1998).

Todas sus realizaciones cumplen con las siguientes condiciones:

- Su origen está ubicado en el baricentro del sistema solar a través del modelado apropiado con VLBI en el marco de la relatividad general (Arias *et al*, 1995).
- Su plano principal es cercano al Ecuador medio en la época J2000.0. El apartamiento del polo del ICRS de aquel definido en dicha época se determina a partir de los modelos más actualizados de nutación del IERS junto al modelo de nutación MHB2000 (Mathews *et al*, 2002) que se explicará más adelante (Petit y Luzum, 2010).
- El origen de la ascensión recta es próximo al equinoccio medio en la época J2000.0 (Petit y Luzum, 2010).

### 2.1.2. Sistema de referencia terrestre

Dentro de las ciencias de la Tierra, particularmente en la geofísica y en la geodesia, resulta de real importancia el posicionamiento preciso. El monitoreo del nivel medio del mar y del cambio climático, tanto como la mitigación de desastres naturales son algunas de sus principales aplicaciones. Además, la georreferenciación es trascendente para el desarrollo sostenible de las naciones, asistiendo en la formulación de políticas y en el desarrollo de sus proyectos. Los sistemas de referencia son utilizados, también, en actividades industriales como en la minería, en la explotación de hidrocarburos, en la agricultura, en el transporte, en la navegación y en la construcción, entre otras, jugando un rol importante en el desarrollo de la actividad humana.

Desde el año 2015, La Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) alienta a los estados miembros y a las organizaciones más relevantes, a compartir sus datos geoespaciales para el beneficio común entre la sociedad y el planeta (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015), y así poder mejorar o llevar a cabo las aplicaciones mencionadas en el párrafo anterior.

La georreferenciación es posible gracias a la determinación de los marcos de referencia terrestres globales, que permiten la compatibilidad de los datos medidos por diferentes organismos alrededor del mundo. La determinación de las posiciones en estos marcos busca ser inequívoca a nivel milimétrico. En 1991, la Resolución N<sup>o</sup>2 de la XX Asamblea General de la Unión Internacional de Geofísicos y Geodestas (1991) (IUGG) consideró la necesidad de establecer un Sistema de Referencia Terrestre Convencional (CTRS) de exactitud milimétrica para determinar deformaciones y efectos relativistas, estableciendo, posteriormente, el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).

El CTRS, por lo impuesto en la resolución mencionada anteriormente, se define a partir una rotación espacial con respecto a un sistema geocéntrico no-rotante idéntico al Sistema de Referencia Geocéntrico (GRS) definido en la resolución N<sup>o</sup>A4 de la XXI Asamblea General de la IAU (1991). La orientación del GRS no presenta una rotación global con respecto a fuentes extragalácticas. Las coordenadas temporales del CTRS, al igual que el GRS, deben ser derivadas de una escala de tiempo materializada por relojes atómicos operando en la Tierra. El CTRS es un sistema geocéntrico, con origen en el centro de masas de la Tierra, incluyendo océanos y atmósfera. La evolución temporal de la

orientación se determina utilizando una condición de no rotación neta con respecto a los movimientos tectónicos horizontales sobre toda la Tierra (XX Asamblea General de la Unión Internacional de Geofísicos y Geodestas, 1991). Luego, el CTRS fue llamado GTRS, Sistema de Referencia Terrestre Geocéntrico, por la resolución de la XXIV Asamblea General de la IUGG (2007). Ese mismo año y durante la misma asamblea, fue adoptado el ITRS como el mejor GTRS para aplicaciones técnicas y científicas, luego de que su primera realización haya sido en 1992. El ITRS posee un sistema de medida métrico del Sistema Internacional de Unidades (SI) y su orientación en todas las realizaciones derivan del alineamiento con sus sistemas antecesores, siendo el primero determinado a partir de la orientación dada por la Oficina Internacional de la Hora (BIH) del sistema de referencia de nominado Sistema Terrestre del BIH 1987 (BTS87), para la época 1984.0 (Petit y Luzum, 2010).

### 2.1.3. Marcos de referencia geodésicos

Como hemos visto en la sección 2.1, un sistema de referencia debe ser materializado mediante puntos fiduciales. Describiremos brevemente como se materializan estos sistemas vistos:

**Marco de Referencia Celeste Internacional (ICRF):** es la materialización del ICRS. Para ello se utilizan un conjunto de cuásares con coordenadas conocidas y posiciones estacionarias, materializados principalmente por la técnica VLBI.

**Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF):** es la materialización del ITRS. Para ello se utilizan un conjunto de puntos con coordenadas y velocidades conocidas, materializados por estaciones equipadas con GNSS, VLBI, DORIS y SLR.

Por otra parte, si bien no forman parte de este trabajo, cabe destacar la existencia de los marcos de referencia verticales. Estos sistemas se determinan a través de una superficie de referencia a partir de la cual puedan ser medidas las coordenadas verticales de ciertos puntos de interés en términos de números geopotenciales. Estos sistemas son materializados a partir de puntos con alturas conocidas. Actualmente, no existe un sistema referencia vertical internacional, pero se están haciendo los esfuerzos necesarios para consumarlo.

## 2.2. Cambios en la orientación de la Tierra

La Tierra, además de estar en constante movimiento en el espacio, es un planeta dinámico que cambia su estructura interna continuamente. Un punto sobre su superficie cambia sus coordenadas instante a instante, tanto en el sistema celeste como en el terrestre, principalmente, debido a los efectos que se explicarán a continuación. Estos últimos se describen a través de los EOP, que además son necesarios para vincular marcos celestes con terrestres.

### 2.2.1. Rotación terrestre

La rotación terrestre es el movimiento de la Tierra que consiste en girar sobre un eje que pasa por su propio centro de masas. Si consideramos el tiempo que tarda el punto vernal medio en pasar 2 veces por el mismo meridiano (despreciando la velocidad anual del equinoccio vernal sobre el Ecuador por precesión), definiendo así el día sidéreo medio con una duración de 23 h 56 min 4.1 s de día solar medio (promedio del día solar verdadero), la velocidad angular media de la rotación será,  $\omega = 7.292115 \times 10^{-5}$  rad/s (Torge, 2001).

Veremos que la velocidad con que rota la Tierra varía temporalmente. Estas variaciones pueden ser descritas mediante un cambio de la Longitud del Día (LOD), que es definido como la

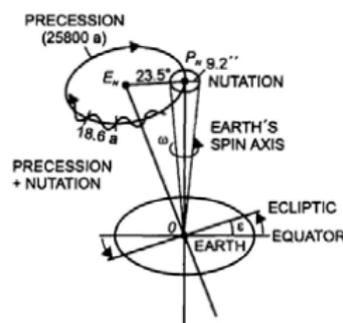
diferencia entre la duración de un día medida por el Tiempo Universal 1 (UT1), que es una escala de tiempo rotacional determinada a partir de observaciones VLBI, y 86.400 segundos medido en el Sistema Internacional (SI), que proviene de medir la duración con una escala de tiempo uniforme. El LOD pone en evidencia cuanto se aparta la rotación verdadera de la Tierra de una rotación uniforme. Este decrece a una razón de  $2 \frac{ms}{siglo}$  debido a la fricción de mareas, y sufre variaciones con períodos de décadas debido al movimiento del núcleo externo líquido. Las mareas también pueden causar variaciones de 1 ms en períodos anuales o semianuales. Otra causa de su variación es debido a efectos estacionales, como cambios en la distribución de masas de la atmósfera y de los océanos. Además, hay otras contribuciones irregulares, por ejemplo, por el fenómeno del El Niño- Oscilación del Sur (ENOS) o cambios de en la distribución de masas por terremotos (Torge, 2001).

Existen estudios sobre como los terremotos afectan a la rotación terrestre, por ejemplo aquel publicado por Nilsson *et al* (2010). En dicho trabajo presentan un análisis de como el terremoto de magnitud 8.8 producido en las cercanías de la ciudad de Concepción, Chile, en el año 2010 afectó a la rotación terrestre. Primero, mencionan que los efectos son observables, sí los terremotos poseen una magnitud aproximadamente mayor o igual a 9 y luego, sugieren que debido a este, el LOD debió crecer entre 0.3 y 0.5  $\mu s$ . Sin embargo, concluyen que a pesar de esto, el crecimiento no pudo ser medido por la baja precisión de los instrumentos de medición y además de esto, porque otros efectos que perturban al LOD adicionalmente, se superponen y no se los puede abstraer completamente de los datos ya que no se los conoce lo suficiente.

### 2.2.2. Precesión y nutación

El eje de rotación de la Tierra en el espacio experimenta cambios en su orientación a lo largo del tiempo, observables desde un sistema de referencia celeste considerado inercial. La precesión es el movimiento de dicho eje debido a las fuerzas gravitatorias lunisulares que se ejercen sobre toda la Tierra, y que generan un torque sobre ella gracias a la existencia del abultamiento ecuatorial. Estas fuerzas tienden a llevar el plano ecuatorial hacia el plano de la eclíptica generando que el eje describa en el espacio un cono con una apertura de, aproximadamente,  $47^\circ$  en un período de 25800 años. A este último movimiento de precesión se le suma aquella precesión debida a otros cuerpos del sistema solar, principalmente los planetas.

En la figura 2.1 se puede apreciar que el eje de rotación no describe un cono perfecto en el sistema de referencia celeste, ya que la órbita de la luna varía su inclinación dentro de una apertura de  $5^\circ$  aproximadamente con respecto a la órbita terrestre, en períodos que van desde los 5 días hasta los 18.6 años. También existen aquellas variaciones anuales y semimensuales debido al paso, tanto del Sol como de la Luna, entre el hemisferio sur y norte de la Tierra visto desde la eclíptica (Torge, 2001).

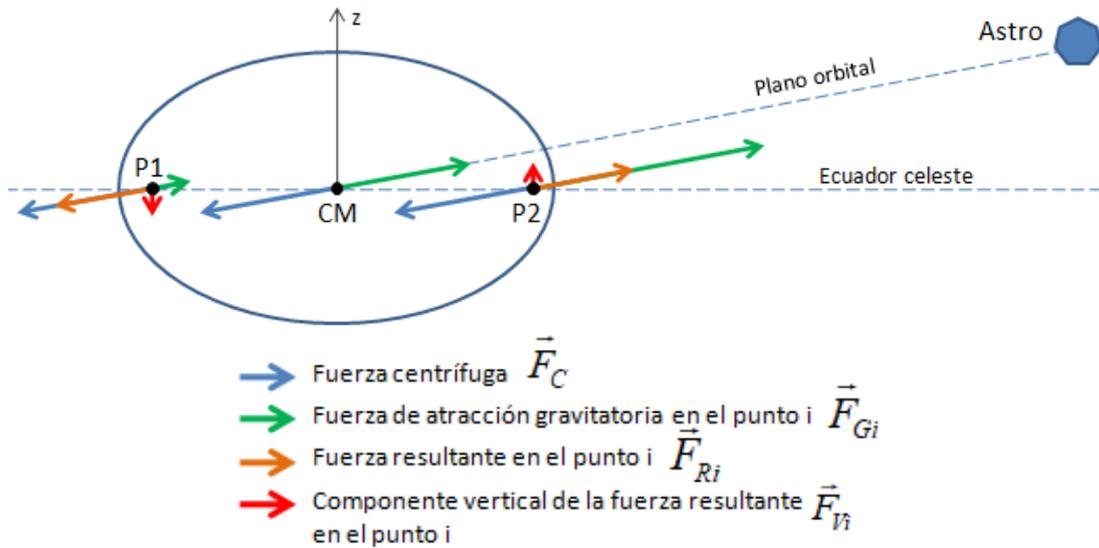


**Figura 2.1:** Esquema de movimiento precesional y nutacional terrestre (Torge, 2001)

Suponiendo que la Tierra posee una distribución de masas con simetría radial y que rota a una velocidad  $\vec{\omega}$  constante, podemos representar a toda su masa concentrada en los puntos P1, P2

y CM (centro de masas) mostrados en la figura 2.2. Tanto el Sol como la Luna, ejercen fuerzas de atracción gravitatoria sobre estos puntos de igual dirección pero de distinta magnitud. La variación de esta fuerza de atracción es aproximadamente lineal entre los tres puntos, debido a que la proximidad que existe entre ellos es muy grande en comparación con la distancia que poseen al cuerpo atractor. Por lo tanto, en el punto sobre el Ecuador más próximo al astro (P2 de la figura 2.2) la fuerza  $\vec{F}_{G2}$  de atracción será mayor que la del punto más alejado (P1 de la figura 2.2),  $\vec{F}_{G1}$ .

Por otra parte, ignorando por un momento la rotación terrestre, estos tres puntos se ven afectados por una fuerza centrífuga,  $\vec{F}_C$ , de igual magnitud y dirección proveniente del movimiento orbital que poseen alrededor del astro. Luego, en el centro de masas, la resultante entre esta última fuerza y la gravitatoria,  $\vec{F}_{G_{CM}}$ , debe ser nula para que la Tierra se mantenga en equilibrio sobre la órbita, y por lo tanto,  $\vec{F}_C = \vec{F}_{G_{CM}}$ . En P1 y P2, debido a que  $\vec{F}_C$  cambia de magnitud, esta resultante no será nula. Al estar estos dos puntos a la misma distancia del centro de masas, las resultantes serán de igual magnitud pero tendrán direcciones opuestas. Sus componentes perpendiculares al plano ecuatorial,  $\vec{F}_{V1}$  y  $\vec{F}_{V2}$ , respectivamente, serán las que produzcan un torque que tiende a llevar al plano ecuatorial a ser coplanar con la Eclíptica, y no sus componentes paralelas, ya que éstas se encuentran en la misma dirección que el radio-vector en los puntos donde se aplican las fuerzas, visto desde el sistema celeste geocéntrico. Como resultado, el torque neto tiene una dirección perpendicular al dibujo y apunta hacia afuera.



**Figura 2.2:** Esquema de fuerzas actuantes en los sistemas Luna-Tierra o Sol-Tierra.

De la ecuación de equilibrio se tiene que un sistema aislado frente un torque externo,  $\vec{N}$ , se verá afectado por un cambio en su momento angular,  $\vec{L}$ , (Newton, 1687)

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{N} \quad (2.2.1)$$

Entonces, por la presencia del torque visto, debe haber un cambio en el momento angular  $\vec{L}$ , en la dirección del torque, es decir perpendicular al eje de rotación terrestre o a su la velocidad angular,  $\vec{\omega}$ . Ya que  $\vec{L} = I\vec{\omega}$ , donde  $I$  es el tensor de inercia, y considerando a la Tierra como un cuerpo rígido, siendo de esta manera  $I$  constante, la variación de  $\vec{L}$  viene dada por una variación en la dirección de  $\vec{\omega}$ . De esta manera, este último cambio hará que el eje de rotación varíe su orientación en el espacio describiendo un círculo visto desde el sistema celeste referido.

### 2.2.3. Movimiento del polo

El movimiento del polo se refiere al movimiento del eje instantáneo de rotación terrestre respecto de la corteza sobre la cual describe una espiral. Su principal causa es que el eje instantáneo de rotación no coincide con la dirección del momento principal de inercia. Por otra parte, la redistribución de masas en la Tierra hace variar el valor del tensor de inercia terrestre y por lo tanto, a la posición del polo. Si modelamos a la Tierra como un cuerpo rígido, el movimiento calculado tendrá un período de 305 días sidéreos en ausencia de fuerzas externas, llamado período de Euler. Luego, si consideramos la elasticidad terrestre obtendremos un período de 435 días sidéreos, dando lugar al denominado bamboleo de Chandler. Este bamboleo es descrito por la componente horizontal de la velocidad angular,  $\omega_E$ , de la rotación, visto desde un sistema terrestre no inercial cuyos ejes coinciden con los ejes principales de inercia. La velocidad del movimiento en el caso del cuerpo rígido depende de los momentos de inercia en la dirección al polo,  $I_p$ , y del Ecuador,  $I_e$ , y de la componente vertical de la velocidad angular en el sistema terrestre,  $\omega_3$ , como se expresa en la siguiente ecuación (adaptado de Torge (2001)):

$$\omega_E = \frac{I_p - I_e}{I_e} \omega_3 \quad (2.2.2)$$

También, se superponen efectos estacionales debido a la redistribución de masas en los océanos y la atmósfera.

Por otro lado, existe otro movimiento del polo denominado deriva polar, en el cual el polo medio calculado período tras período, se traslada a una razón de de  $0.003''/yr$ , principalmente debido al derretimiento de los casquetes polares y al movimiento de las placas tectónicas (Torge, 2001), cuyas redistribución de masas hacen variar a  $I_p$  e  $I_e$ . La figura 2.3 representa un esquema del movimiento resultante.

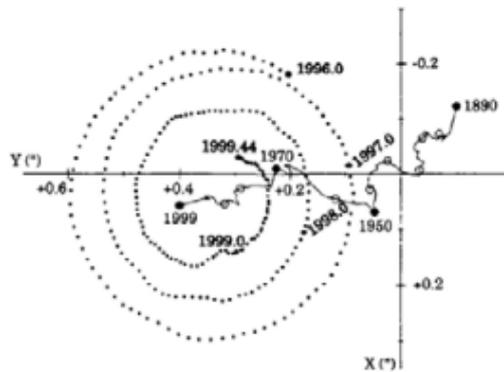


Figura 2.3: Esquema del movimiento del polo (Torge, 2001).

## 2.3. Descripción de los parámetros de orientación terrestre

Como hemos visto, la rotación y la orientación terrestre son irregulares en el tiempo, y es necesario cuantificar esa irregularidad a través de los EOP para relacionar los marcos de referencia terrestres con los celestes.

### 2.3.1. Definiciones útiles vinculadas a los sistemas de referencia geodésicos

Las definiciones que se verán en esta sección serán de utilidad para comprender las transformaciones entre sistemas, las cuales se corresponden con las últimas resoluciones de la IAU.

Un Sistema de Referencia Celeste Baricéntrico (BCRS) es un sistema de referencia definido de tal manera de que sus ejes no poseen una rotación respecto a fuentes extragalácticas y su origen se posiciona en el baricentro del sistema solar. La resolución del IAU 2006 establece que la orientación del BCRS es igual a la del ICRS, a menos que se indique lo contrario.

Un Sistema de Referencia Celeste Geocéntrico (GCRS) es definido de tal manera que su origen se sitúa en el centro de masas de la Tierra y es no rotante con respecto al BCRS.

El Polo Celeste Intermedio (CIP) es un polo de un sistema intermedio utilizado para facilitar la transformación entre el GCRS y el ITRS. Su posición en el GCRS resulta de tener en cuenta los movimientos de precesión y nutación cuyos períodos son mayores a 2 días, el movimiento retrógrado diario del polo, incluyendo los efectos de la oscilación libre del núcleo (FCN). Su posición en el ITRS, tiene en cuenta los movimientos de nutación y precesión de períodos menores a 2 días y la parte del movimiento polar que queda fuera del movimiento retrógrado diario.

Un origen no-rotante en el GCRS o el ITRS, es un punto en el Ecuador Intermedio (ecuador del CIP) que no posee movimiento instantáneo a lo largo de dicho ecuador visto, ya sea, desde el GCRS o del ITRS, respectivamente. Se definen dos orígenes de este tipo, el Origen Intermedio Celeste (CIO) para el GCRS y el Origen Intermedio Terrestre (TIO) para el ITRS.

El Sistema de Referencia Terrestre Intermedio (TIRS) es un sistema de referencia geocéntrico definido por el Ecuador Intermedio del CIP y por el TIO, que se relaciona con el ITRS por medio del movimiento del polo, y la locación del TIO. Y el Sistema de Referencia Celeste Intermedio (CIRS), es aquel definido por el Ecuador Intermedio del CIP y el CIO de una época determinada (Capitaine *et al.*, 2005).

### 2.3.2. Cuantificación de la rotación

La rotación terrestre es medida mediante el ángulo de rotación terrestre (ERA) es medido a lo largo del ecuador del CIP, entre el TIO y el CIO (Petit y Luzum, 2010), cuyos valores positivos son en la dirección retrógrada (figura 2.6). Es relacionado con UT1 mediante la una expresión lineal, recomendada por la resolución B1.8 de la XXIV Asamblea General de la IAU (2000) y dada por Capitaine *et al.* (2000) con la siguiente forma:

$$ERA(T_U) = \theta(T_U) = 2\pi(0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_U) \quad (2.3.3)$$

Donde,

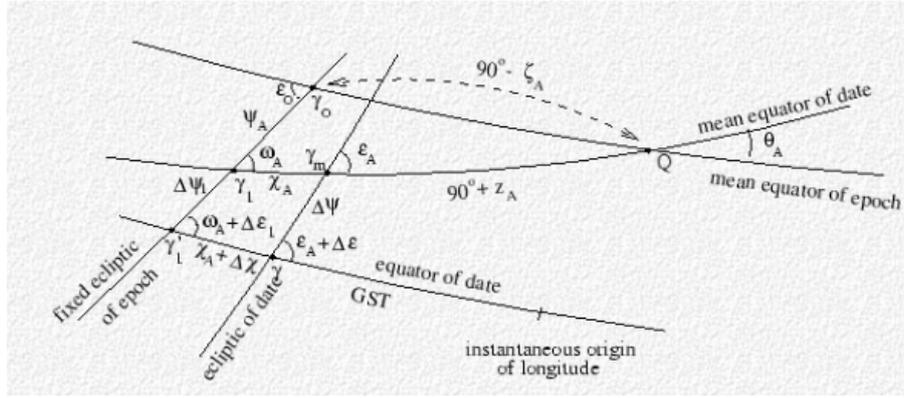
$$T_U = (UT1FechaJuliana) - (FechaJulianaEpoca2000.0) = (UT1FechaJuliana) - 2451545.0 \quad (2.3.4)$$

$$UT1 = UTC - (UTC - UT1) \quad (2.3.5)$$

UT1 es una escala de tiempo rotacional mientras que el Tiempo Universal Coordinado (UTC), es una escala de tiempo uniforme que sigue la marcha del Tiempo Atómico Internacional (TAI), y pega un salto de 1 s, cada vez que sea necesario para que  $|UT1 - UTC|$  no supere 0,9 s. El origen del TAI fue dispuesto en 1958, de tal manera que  $TAI - UT1 = 0$  en esa época (1958.0).

### 2.3.3. Cuantificación de la precesión y nutación

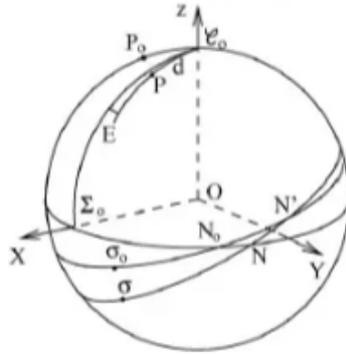
Antiguamente, la precesión y la nutación, se describían con los ángulos  $\Delta\psi_1$ ,  $\Delta\varepsilon_1$ , y  $\chi_A$  que se muestran en la figura 2.4, y que relacionan a la Eclíptica, al plano ecuatorial instantáneo y al plano ecuatorial medio de la fecha entre ellos, para una época de referencia determinada teniendo en cuenta las ecuaciones de la dinámica. Las variaciones de estos planos se deben a los movimientos de precesión y nutación.



**Figura 2.4:** Descripción de ángulos involucrados en la nutación y precesión (Capitaine, 2000).

Actualmente, la antigua cuantificación de la nutación y de la precesión es reemplazado por la determinación de la dirección del CIP en el GCRS con el objetivo de separar los movimientos de este en un sistema celeste con respecto a los que tiene en un sistema terrestre. De esta manera, también, se evita que la nutación sea considerada dos veces en ambos sistemas como sucedía en el modelo anterior.

La posición del CIP en el GCRS puede ser dada en términos de los ángulos  $E$  y  $d$  (Capitaine y Wallace, 2006), medidos desde el eje  $X$  y  $Z$  del GCRS, respectivamente. Luego, mediante la inversa de las expresiones de 2.3.6 y 2.3.7, se puede obtener su descomposición en el eje  $X$  e  $Y$  del GCRS. Usualmente, se refiere con  $X$  e  $Y$  a los cosenos directores del CIP, que pueden ser multiplicados por  $1296000''/2\pi$  para representar aproximadamente los ángulos correspondientes (Capitaine *et al*, 2005).



**Figura 2.5:** Coordenadas del CIP ,  $d$  y  $E$  , y el CIO,  $\sigma$  (Capitaine, 2009)

$$E = \arctan \frac{Y}{X} \quad (2.3.6)$$

$$d = \arcsen \left[ (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.3.7)$$

Normalmente, se encuentran a estos parámetros expresados a partir del apartamiento que poseen con respecto a un modelo teórico de nutación y precesión, y por lo cual son denotados como  $dX$  y  $dY$ . Estos últimos son denominados en inglés “celestial pole offsets”, y en este trabajo offsets del polo celeste.

### 2.3.4. Cuantificación del movimiento del polo

El movimiento del polo se describe en términos de  $xp$  e  $yp$ , que son los cosenos directores en X e Y del CIP en el ITRS, que pueden ser multiplicados por  $1296000''/2\pi$  para expresarlos en forma de ángulos. El ángulo  $xp$  se mide a lo largo del meridiano de  $0^\circ$  de longitud y el ángulo  $yp$  se mide en el meridiano de  $90^\circ$  de longitud Oeste (Capitaine *et al.*, 2005).

Estos parámetros son obtenidos gracias a las observaciones realizadas con las cuatro técnicas geodésicas.

## 2.4. Transformación entre sistemas de referencia celestes y terrestres

Teniendo en cuenta los efectos mencionados en secciones anteriores y su asociación directa con los EOP, la transformación de coordenadas desde el ITRS al GCRS, implica la siguiente multiplicación:

$$[GCRS] = Q(t)R(t)W(t) [ITRS] \quad (2.4.8)$$

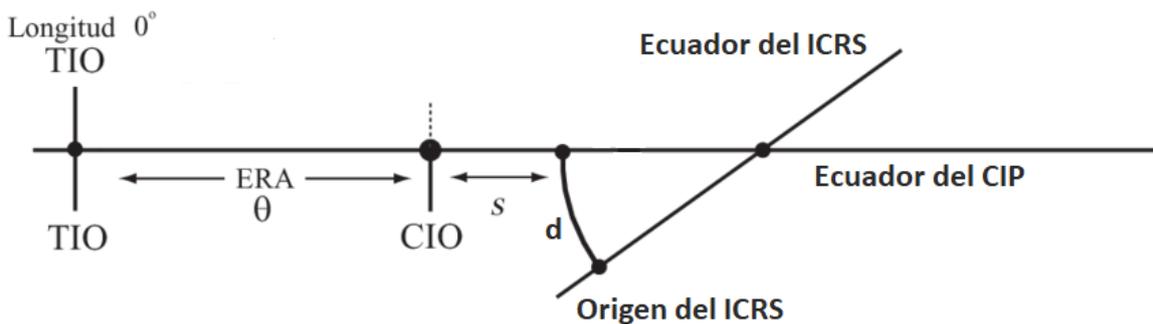
Donde  $Q(t)$  es una matriz cuyos coeficientes involucran el movimiento del polo celeste intermedio en el sistema de referencia celeste,  $R(t)$  tiene en cuenta la rotación terrestre, y  $W(t)$  al movimiento polo.

Si solo aplicamos la transformación de  $W(t)$  a las coordenadas en ITRS obtendremos dichas coordenadas en el TIRS, que utiliza al CIP como su eje Z y al TIO como el X. Luego, el CIRS se puede derivar del ITRS aplicando, además de la transformación anterior, una rotación proveniente de la matriz  $R(t)$  dependiente del ángulo  $ERA$ . Finalmente, el CIRS se relaciona con el GCRS a través del uso de la matriz  $Q(t)$  que implica el uso de las coordenadas del CIP en el GCRS.

Veamos como se componen cada una de estas matrices. Para el movimiento de polo, tenemos

$$W(t) = W_z(-s')W_y(xp)W_x(yp) \quad (2.4.9)$$

donde  $W_y$ ,  $W_x$  y  $W_z$  son matrices de rotación que tienen en cuenta  $xp$  e  $yp$ , es decir las coordenadas vistas anteriormente sobre la posición del CIP en el ITRS, y de  $s'$ , que es la ubicación del TIO en el ecuador del CIP.



**Figura 2.6:** Representación de ángulos en la transformación entre GCRS e ITRS (Hohenkerk, 2005)

Para el caso de la rotación tenemos que la matriz  $R$  solo depende de  $ERA$ ,

$$R(t) = R_z(-ERA) \quad (2.4.10)$$

Y finalmente para la precesión y nutación,

$$Q(t) = Q_z(-E)Q_y(-d)Q_z(E)Q_z(s) \quad (2.4.11)$$

donde estas matrices dependen de  $E$  y de  $d$ , que habíamos visto que son las coordenadas del CIP en el GCRS, y además dependen de  $s$  que es la posición del CIO en el ecuador del CIP, como se muestra en la figura 2.6. Por otra parte, estas matrices también dependen de las coordenadas cartesianas,  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , del CIP, que derivan de  $d$  y  $E$ , como se expresa en los siguiente (Petit y Luzum, 2010):

- $X = \sin(d)\cos(E)$
- $Y = \sin(d)\sin(E)$
- $Z = \cos(d)$

## Capítulo 3

# Principios de la técnica VLBI

La geodesia espacial tiene, entre sus objetivos, determinar las coordenadas de ciertos puntos de interés en los sistemas de referencia, tanto celestes como terrestres, a partir de mediciones realizadas sobre objetos externos a la Tierra. En el contexto de este trabajo, hablaremos de VLBI, una de las cuatro técnicas espaciales de medición que se mencionaron en el capítulo 1.

VLBI realiza un aporte vital en la geodesia espacial, ya que es la única técnica que permite determinar todos los EOP y materializar los sistemas de referencia celestes con una precisión submilimétrica.

### 3.1. Principio de funcionamiento

VLBI parte de la observación de radiofuentes extragalácticas a través de una red global de antenas o radiotelescopios. Dichas radiofuentes, por encontrarse a grandes distancias, no poseen un movimiento propio observable desde la Tierra y su radiación llega a esta como un frente de onda plano.

En principio son necesarios dos radiotelescopios separados por cientos a miles de kilómetros apuntando a una misma radiofuente para llevar a cabo la observación VLBI. La señal observada no llega a ambas antenas al mismo tiempo, sino que a una de ellas llega con cierto retardo, principalmente, a causa de la geometría del sistema como se muestra en el esquema de la figura 3.1.

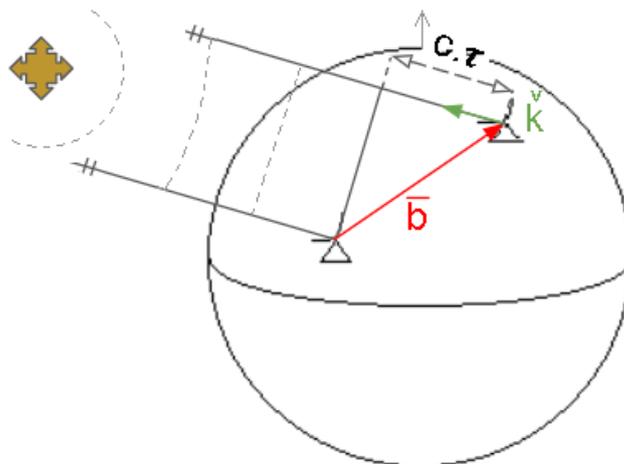


Figura 3.1: Geometría de la técnica VLBI.

Esta diferencia de tiempo de llegada denominada retardo,  $\tau$ , puede ser aproximada mediante

la siguiente expresión (Böhm *et al*, 2018):

$$\tau = t_2 - t_1 = -\frac{\vec{b} \cdot \check{k}}{c} \quad (3.1.1)$$

donde,  $t_i$  es el tiempo de llegada de la señal a la antena  $i$  suponiendo que esta recorre un espacio vacío;  $\vec{b}$  es el vector línea de base entre ambas antenas, que es igual a la diferencia entre los vectores posición de ambas;  $\check{k}$  es el vector director de la posición de la radiofuente en el mismo sistema de referencia que  $\vec{b}$ , como se muestra en la figura 3.1 y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío.

La expresión 3.1.1 nos indica que conociendo el retardo,  $\tau$ , junto a la posición de las radiofuentes es posible obtener, entre otras cosas, la línea de base que separa ambas estaciones.

Las radiofuentes utilizadas son núcleos activos de galaxias (ver sección 3.2), en particular los cuásares. Estos objetos emiten una señal electromagnética en un gran espectro de frecuencias, donde cada componente espectral tendrá su propia velocidad de propagación denominada velocidad de fase,  $\vec{v}_f$  y su respectivo retardo  $\tau_f$ . Sin embargo, es posible determinar una única velocidad para todo el conjunto de las fases, obteniendo así la velocidad de grupo  $\vec{v}_g$  con su respectivo retardo  $\tau_g$ .

El retardo de grupo se puede calcular como (Sovers *et al*, 1998),

$$\tau_g = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (3.1.2)$$

donde  $\phi$  es la fase de la señal y  $\omega$  es la frecuencia angular. Este retardo es el usado en la ecuación 3.1.1 y a partir de aquí, se lo denotará tan solo como  $\tau$ .

Si se tiene una señal  $a(t)$  que es adelantada un tiempo  $t_0$  de tal manera que se obtiene  $a(t-t_0)$ , su transformada de Fourier será,

$$\mathcal{F}\{a(t-t_0)\} = \mathcal{F}\{a(t)\} \cdot e^{-i\omega t_0} \quad (3.1.3)$$

donde  $\omega = 2\pi\nu$  es la velocidad angular para cada frecuencia,  $\nu$ , componente de la señal  $a(t)$ . Y si  $\mathcal{F}\{a(t)\} = A(\omega) \cdot e^{-i\phi'(\omega)}$ , entonces el espectro de fase de la señal adelantada será

$$\phi\{a(t-t_0)\} = \phi'(\omega) + \omega t_0 \quad (3.1.4)$$

Si ambas señales llegan al mismo tiempo, la correlación será de fase cero, pero frente a la existencia de un retardo,  $\tau$ , entre las dos, esta misma correlación se verá adelantada por la misma cantidad de tiempo que el retardo. Por lo tanto, el espectro de fase de dicha correlación se encontrará afectada por un cambio en su pendiente, que por lo visto en la ecuación 3.1.4, será equivalente al retardo tal que  $t_0 = \tau$ .

## 3.2. Radiofuentes

Como dijimos en la sección 3.1, las radiofuentes deben estar lo suficientemente alejadas de la Tierra como para no poseer un movimiento propio observable, de tal manera que puedan ser utilizadas como puntos de referencia. A partir de estas se pueden materializar sistemas de referencia inerciales que pueden servir, por ejemplo, para determinar la orientación de un sistema no inercial solidario con la Tierra.

Las radiofuentes deben ser altamente energéticas para que la radiación electromagnética emitida por ellas llegue a la Tierra y puedan ser observadas. Otra característica que deben cumplir es que

tienen que ser lo más puntuales posible, para no dar lugar a múltiples puntos de referencia sobre la misma fuente.

Por lo tanto, las radiofuentes elegidas por excelencia son los cuásares ya que cumplen con bastante rigurosidad todo lo mencionado en el párrafo anterior. Estos son núcleos de galaxias activas donde la emisión de energía supera extremadamente la emitida por ciertas galaxias que poseen características similares a la Vía Láctea. El causante del brillo de los cuásares es cada agujero negro que se encuentra en el centro estas galaxias, y este puede variar debido las eyecciones altamente energéticas que se dan ocasionalmente. Un agujero negro atrae hacia él toda materia que encuentran en su cercanía, formando un disco de acreción y produciendo una gigantesca cantidad de energía en las frecuencias del óptico, de las radio-ondas y del ultravioleta (Sparke y Gallagher III, 2007).

### 3.3. Instrumental

La señal proveniente de los cuásares arriba al plato primario parabólico de la antena, que luego de reflejarse eventualmente en un plato secundario, se dirige hacia el feed horn, donde la señal electromagnética es convertida en una corriente eléctrica. El feed horn, idealmente, se encuentra en el foco del último reflector de tal manera de concentrar allí toda la energía que llega, aunque esto varía dependiendo de la antena.

Las antenas poseen dos ejes de rotación, que le permiten apuntar hacia cualquier punto del cielo, por ejemplo, estos pueden ser un eje de rotación azimutal y otro de elevación. Su intersección constituye idealmente el punto de referencia espacial de la antena denominado punto invariante. Por otro lado, la referencia temporal se da en el punto de inyección de los pulsos de calibración de fase (ver sección 3.9.3).

Una vez que la señal entra al feed horn, se enfrenta a su primera etapa de amplificación y filtrado. La amplificación se realiza en un contenedor criogénico sellado al vacío para maximizar la ganancia y reducir el ruido espurio.

Un parámetro a tener en cuenta, es la Densidad de Flujo Equivalente del Sistema (SEFD), que es igual a la densidad de flujo de una fuente puntual en dirección del lóbulo principal de radiación de la antena, que haría que la potencia del ruido en el receptor fuera el doble del ruido del sistema en ausencia de la fuente. Dicho parámetro cuantifica la sensibilidad combinada entre la antena y su sistema de recepción, y puede ser expresado como,

$$SEFD = \frac{2kT}{A} \quad (3.3.5)$$

donde  $k$  es la constante de Boltzman,  $T$  es la temperatura del sistema y  $A$  es el área de la antena (Thompson *et al*, 2017).

Luego de la recepción de la señal, esta pasa por un sistema denominado “Down converter”, donde es convertida desde las radiofrecuencias hacia frecuencias denominadas “intermedias” de varios MHz con la ayuda de osciladores locales. Después, la señal se envía por medio de largos trayectos de cable hacia el “Baseband converter”, donde se la separa en sub anchos de banda y se la lleva al ancho de banda base. Previamente, se la debe pasar por el módulo de “Up converter” donde se lleva a la señal a frecuencias mayores para hacerla compatible con el “Baseband converter” (García y Salguero, com. personal).

Finalmente, la señal es digitalizada, por lo general, utilizando el sistema de digitalización de 1 bit, donde un 0 significa un valor negativo de tensión en la señal y un 1 un valor positivo. También se suelen utilizar un sistema de 2 bits donde se puede agregar valores que indica si la tensión ha superado cierto valor umbral. Finalmente, los datos son almacenados en unidades de disco.

### 3.3.1. Sesiones VLBI

Una sesión VLBI consiste en un conjunto de antenas coordinadas para observar determinadas fuentes por un período de tiempo finito. Las más comunes suelen durar 1 o 24 horas.

A las sesiones de 1 hora se las denominan Intensivas y se llevan a cabo todos los días con el objetivo de estimar en tiempo casi real el tiempo universal UT1. Por lo general, este tipo de sesiones involucran entre 2 y 4 antenas.

Otras de las sesiones comunes son aquellas de 24 horas de duración denominadas “Rapid turnaround” y que se realizan los días lunes y jueves (IVS-R1 e IVS-R4, respectivamente). Su objetivo es entregar resultados de EOP lo más rápido posible utilizando una red de hasta 14 antenas, pudiendo llegar a realizar una gran cantidad de observaciones en simultáneo.

Por otro lado, existen aquellas sesiones bajo el nombre de IVS-T2 utilizadas para monitorear el estado de ITRF, y son llevadas a cabo 2 veces por mes. También existen las denominadas IVS-CRF encargadas de mantener ICRF y de densificar su red.

Por otra parte, cabe mencionar que cada 3 años se llevan a cabo sesiones especiales denominadas “Campaña de observación VLBI continua” (CONT) donde el tiempo de observación es muy prolongado y sin interrupciones. Estas sesiones se realizan con el objetivo de estudiar el estado de la red y por ejemplo, determinar si esta introduce algún tipo de error en la determinación de los EOP. Para llevar a cabo las CONT se debe observar durante 2 semanas de manera continua.

Existen otras sesiones cuya red de estaciones involucran solo algunas regiones con el objetivo de estudiar fenómenos locales.

Las sesiones son programadas con un año de anticipación por un centro coordinador y son publicadas en los denominados Master Schedules (Nothnagel *et al*, 2017). Aproximadamente una o dos semanas previas a la fecha de observación, un centro de operación prepara el cronograma de observación para cada una de las antenas involucradas, que posteriormente son descargados por las estaciones y el correlador (ver sección 3.8). En la actualidad, gran parte de las sesiones geodésicas de VLBI se programan utilizando un software llamado SKED (Gipson, 2016), que es mantenido y actualizado por el Centro de Vuelo Espacial Goddard (GSFC) de La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) de Estados Unidos .

## 3.4. Correlación

Las señales digitalizadas por cada estación son enviadas a un correlador con el objetivo de realizar la correlación entre cada par de señales provenientes de dos antenas diferentes de la sesión. Luego, en un proceso de postcorrelación, se obtiene, la amplitud de cada una de estas señales, el retardo de grupo, el retardo de fase y el cambio de este último con el tiempo para cada correlación hecha.

El retardo entre dos señales continuas,  $V_1(t)$  y  $V_2(t)$ , se define como aquel que maximiza la siguiente función de correlación,

$$R(\tau_0) = \frac{1}{T} \int_0^T dt V_1(t) V_2^*(t - \tau_0) \quad (3.4.6)$$

donde  $T$  es el intervalo de promediado,  $*$  denota el complejo conjugado y  $\tau_0$  es el retardo (Sovers *et al*, 1998) . Y si tomamos a modo de ejemplo, la representación de 1-bit para las señales, cada retardo puede ser calculado a partir de la forma discreta de la ecuación 3.4.6.

Al momento de la observación, la rotación de la Tierra introduce una desviación en la frecuencia de las señales debido al efecto Doppler, el cual debe ser corregido en los datos ya que para realizar la correlación, ambas señales deben estar estas referidas a la misma frecuencia de referencia.

Cuando la variación del retardo en el tiempo es positivo nos dice que la antena se está alejando de la fuente, produciendo una disminución de la frecuencia (Nothnagel, 2023). Para corregir por este efecto, podemos cambiar dicha frecuencia multiplicándola por una función periódica, como lo es un seno y un coseno, y cuyo período debe ser equivalente al introducido por el apartamiento generado por el efecto Doppler. El retardo,  $\tau_g$ , puede ser determinado solo si se tiene en cuenta la derivada con respecto al tiempo del retardo de fase,  $\dot{\tau}_f$ .

A la señal correlada se le debe aplicar un promedio sobre varios bits con el objetivo de resaltar la señal por sobre el ruido.

La correlación es llevada a cabo para varios canales de frecuencia en simultáneo y en diferentes tiempos. Sabemos por la ecuación 3.1.4 que la pendiente de la fase de la correlación en función de la frecuencia es igual al retardo de grupo. Por otro lado, que el retardo de fase de cada componente,  $\tau_f = \phi_0/\omega_0$  y que  $\dot{\tau}_f = \frac{1}{\omega_0} \frac{\partial \phi}{\partial t}$  entonces si linealizamos a  $\phi(\omega, t)$ , tenemos (Sovers *et al*, 1998)

$$\phi(\omega, t) = \omega_0 \cdot \tau_f(\omega_0, t_0) + \tau_g(\omega - \omega_0) + \omega_0 \dot{\tau}_f(t - t_0) \quad (3.4.7)$$

En la postcorrelación, muestras de fase de la correlación en función de la frecuencia en varios canales y tiempos, son ajustadas a la expresión 3.4.7. Mediante este proceso, también llamado de “fringe fitting”, se puede hallar el retardo de grupo. Hay que considerar que existe una ambigüedad debido a que el espaciamiento entre canales de frecuencia presenta dominios en los que no hay información de fase y por lo tanto, se debe aplicar alguna técnica de interpolación para estimar la función en dichas discontinuidades.

### 3.5. Estructura de datos VgosDB

Una vez que los datos son postprocesados, se construye la base de datos en formato VgosDB que conforma la entrada de la etapa de análisis. Este formato sirve como base de datos para almacenar e intercambiar la información obtenida de las observaciones. Los datos están relacionados con las estaciones participantes de cada sesión VLBI y sus observables. En el interior de estos archivos podemos encontrar distintos tipos de información como son las posiciones a priori de las antenas y las fuentes, información meteorológica, los retardos de grupo, etc.

La base de datos VgosDB está constituida por un sistema de archivos organizados en varias carpetas. Estos archivos están en el formato denominado “Formato de Datos Comunes de Red” (NetCDF), de tipo binario, muy común dentro de la comunidad científica para almacenar datos de rápido acceso. Además, existe un fichero denominado Wrapper que es utilizado como organizador de los archivos e indica cuáles directorios utilizar para los distintos procesos (Gipson, 2021).

### 3.6. Precisión en las observaciones VLBI

La relación señal ruido (SNR) es una cantidad adimensional en VLBI, que tiene cierta correspondencia con la precisión de los observables. La SNR puede ser definida por (Whitney, 1974),

$$SNR \equiv \rho_0 \sqrt{2\Delta\nu T} \quad (3.6.8)$$

donde  $\Delta\nu$  es el ancho de banda de la señal,  $T$  es el tiempo de integración y  $\rho_0$  la amplitud normalizada de la correlación que se escribe de la siguiente manera:

$$\rho_0 \approx \sqrt{\frac{T_{A_1} \cdot T_{A_2}}{T_{S_1} \cdot T_{S_2}}} \quad (3.6.9)$$

donde  $T_{A_i}$  es la temperatura de la antena  $i$ , y  $T_{S_i}$  es la temperatura del sistema de la antena  $i$ .

La temperatura de la antena depende de la densidad de flujo de la fuente,  $S$ , y además, al momento de calcular la SNR se debe considerar la digitalización de la señal analógica, por lo tanto la SNR puede ser calculada como:

$$SNR = \eta \frac{S}{2k} \sqrt{\frac{A_1 \cdot A_2}{T_{sys_1} \cdot T_{sys_2}}} \sqrt{2\Delta\nu T} \quad (3.6.10)$$

donde,  $\eta$  es el factor de pérdida por digitalización;  $k$ , la constante de Boltzmann;  $A_i$ , el área efectiva de la antena  $i$ ;  $T_{sys_i}$ , temperatura del ruido del sistema de recepción de la antena  $i$  y  $\Delta\nu$  el ancho de banda total del sistema.

Por otro lado, la dispersión en la determinación del retardo de grupo es (Whitney, 1974)

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi\Delta\nu_{SNR}SNR} \quad (3.6.11)$$

donde  $\Delta\nu_{SNR}$  es el ancho de banda efectivo del sistema de recepción que depende de la cantidad de canales,  $n$ ;  $\nu_i$ , las frecuencias individuales de cada canal y  $\bar{\nu}$ , la frecuencia media de la señal.

$$\Delta\nu_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\nu_i - \bar{\nu})^2}{n}} \quad (3.6.12)$$

Expresiones como la 3.6.11 y 3.6.8 indican que cuanto mayor es el ancho de banda y mayor el tiempo de integración, mejor es el SNR y menor es el error del retardo de grupo. Sin embargo, por cuestiones operativas, se debe encontrar un compromiso entre ambas cantidades.

### 3.7. Tecnologías VLBI: VGOS vs Legacy

En los últimos años se ha desarrollado una nueva tecnología para la adquisición de datos VLBI, y su subsecuente adaptación en los demás procesos de la técnica. Esta nueva tecnología denominada VGOS, ha mejorado el instrumental en cuanto a las dimensiones de las antenas (platos de 12 a 13 m) y en su rapidez de giro, mayor a  $360^\circ/min$ . Si la comparamos con la tecnología S/X Legacy, que pueden llegar a poseer platos de hasta 100 m de diámetro y velocidades de 20 a  $200^\circ/min$ , VGOS es más eficiente. Unos de los principales cambios es el ancho de banda en el cual observan, convirtiendo al de las Legacy, que poseen un pequeño ancho de banda alrededor de 8,4 GHz para la banda X y alrededor de 2,3 GHz para la banda S, a un ancho de banda idealmente de 2 a 14 GHz, dividido a su vez en 4 bandas distintas no adyacentes (Nothnagel, 2023).

Por lo general, las VGOS poseen un SEFD menor a 2500 y una capacidad de grabación de 8, 16 o 32 Gbps, superando ampliamente las capacidades de las Legacy que poseen una capacidad de grabación de 128, 256 y 512 Mbps, y un valor de SEFD que puede superar considerablemente las 3 cifras.

Como conclusión, esta nueva tecnología reduce los costos de la antena y mejora la sensibilidad y precisión de la técnica. También, la mayor cantidad de observaciones que pueden realizar mejora la

resolución espacial y temporal en la estimación del efecto de la tropósfera sobre la señal (Nothnagel, 2023).

Cabe remarcar que debido a las distintas frecuencias que utilizan ambas antenas con distintas tecnologías, es imposible realizar línea de base entre ellas, a menos que las antenas VGOS puedan cambiar su frecuencia de medición momentáneamente. Por lo cual existen ciertas líneas de base que se irán perdiendo a medida que algunas antenas renueven su tecnología y otras no.

### 3.8. Coordinación global de las observaciones VLBI

El IVS es el encargado de coordinar las observaciones globales y el análisis de los datos de VLBI, con el objetivo de proporcionar productos de alta calidad para sus usuarios. Dicha institución debe mantener a la técnica como un sistema de observación global y además, ser un soporte para las investigaciones geodésicas, geofísicas y astrométricas.

El IVS se divide en 7 componentes:

- Red de Estaciones: es la encargada de adquirir los datos provenientes de las fuentes que llegan a los radiotelescopios. Además, éstas deben informar datos meteorológicos entre otra información local, para ser usados en etapas posteriores. Toda la información adquirida es enviada a los correladores.
- Correladores: son los encargados de cuantificar los observables VLBI, principalmente, el retardo de grupo entre pares de antenas; más aún, proveen cierta retroalimentación a las estaciones para mejorar su funcionamiento y además, preparan los datos de los observables para almacenarlos en los centros de datos.
- Centros de datos: son repositorios de datos provenientes de los schedulings (programas de observación), de las correlaciones y de los análisis, ejemplos de estos son los Master Schedule, los observables y los EOP. Estos centros deben encargarse de distribuir dichos productos.
- Centros de análisis: Existen diferentes tipos de centros de análisis que se encargan de determinar a partir de los observables obtener distintos parámetros como los EOP, a detallar,
  - Centro de análisis asociado: debe entregar productos derivados de sesiones completas. Sus datos son usados para estudio de fenómenos regionales, para cierto mantenimiento de los marcos, para determinaciones especiales de EOP y para la investigación de nuevos resultados.
  - Centro de análisis operativo: debe entregar resultados especificados por el coordinador de análisis de IVS, de forma programada. Debe calcular los EOP, las coordenadas de las estaciones y de las fuentes a intervalos regulares. Por otro lado, también producen una retroalimentación para el desarrollo de las estaciones.
  - Centro de análisis especiales: tiene la responsabilidad sobre investigaciones relacionadas a series de todo tipo en curso. Hace análisis comparativo de cada sesión de una serie luego de la correlación.
  - Centro de análisis de combinación: realiza la combinación de los resultados de los centros de análisis operativos, controlando la calidad de los productos subidos. Finalmente, obtienen series de EOP para sesiones de 24 y 1 hora. Sus productos pueden ser usados como datos de entrada para el cálculo de ITRF.

- Centro coordinador: es el responsable de coordinar todas las actividades del IVS. Planifica, comunica y monitorea las actividades que las demás componentes deben llevar a cabo y es encargado de mantener los Master Schedule de las observaciones.
- Centros de operación: son los encargados de coordinar los scheduling de la red, generando los programas de observación detalladamente, conteniendo, por ejemplo, la forma en que las estaciones deben observar. Luego, los schedulings son publicados en el centro de datos para ser tomados. Los centros de operación siguen las indicaciones del centro coordinador para cumplir con los tiempos y el formato de la programación.
- Centros de desarrollo tecnológico: contribuyen al desarrollo de nueva tecnología, mediante la investigación y el ensayo de nuevos desarrollos, tanto para hardware como para software (Nothnagel *et al.*, 2017).

### 3.9. Análisis de datos VLBI y determinación de EOP

#### 3.9.1. Flujo de procesamiento

El análisis VLBI tiene como objetivo estimar las coordenadas de las fuentes, los parámetros de orientación terrestre y las coordenadas de las antenas. Adicionalmente, se pueden estimar los retardos troposféricos húmedos sobre las antenas y los desvíos que poseen los estándares tiempo usados por cada una de estas estaciones durante la observación.

Dicho análisis se lleva a cabo mediante la resolución de un problema inverso sobredeterminado, cuyos parámetros incógnitas son los mencionados en el párrafo anterior y donde sus valores “reales” representan el estado del sistema estudiado en el momento de la observación. Por otro lado, nuestros datos de entrada para la resolución de dicho problema son los retardos multibanda entre cada par de antenas VLBI. Y su resolución viene dada por la estimación de mínimos cuadrados, a través del método de Gauss-Markov o algún otro, como el del filtro de Kalman. En este trabajo nos concentraremos en el primero mencionado, ya que la estimación hecha por el IGN se basa en éste.

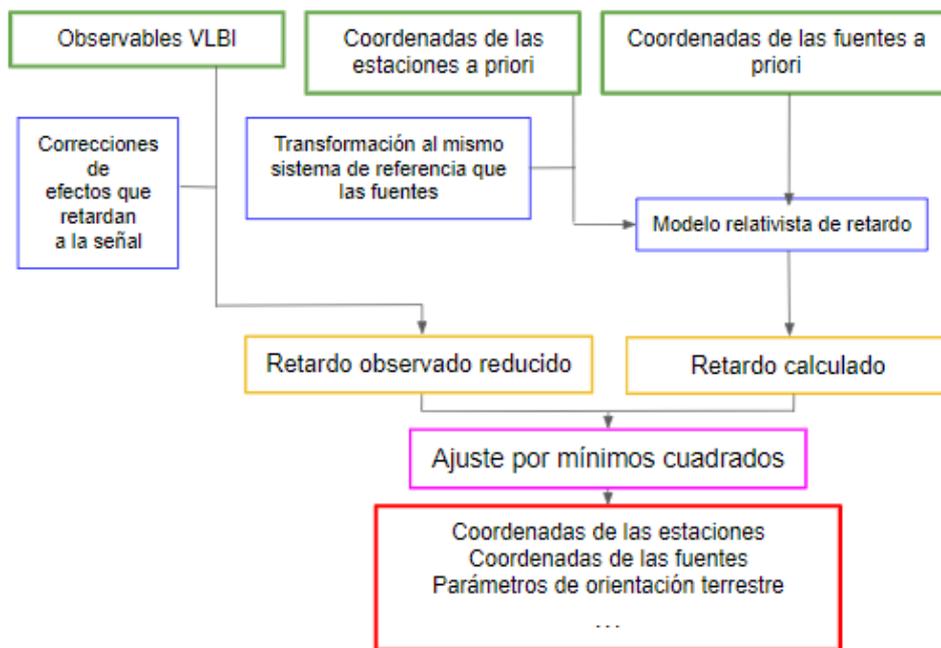


Figura 3.2: Esquema sobre el cálculo de los parámetros provenientes de la observación VLBI.

Como en todo problema de mínimos cuadrados de Gauss-Markov, el flujo del proceso involucra el cálculo de un retardo teórico,  $\tau_{apriori}$ , que proviene de un modelo inicial que se aproxima a la situación real, menos el retardo observado o calculado como se muestra en el esquema de la figura 3.2. Para el cálculo del retardo teórico, primero se precisan las coordenadas de las estaciones y de las fuentes a priori. Las primeras deben ser determinadas para la época de observación en un sistema de referencia terrestre y luego deben ser llevadas a uno celeste, donde finalmente se calculan los retardos teóricos. En estas transformaciones, debemos tener en cuenta, ciertas correcciones relativistas sobre las coordenadas de las estaciones y los tiempos de referencia, así como también, hacer uso de los modelos de velocidades y de deformación cortical, como se explicará más adelante.

Los retardos teóricos son restados a los observados reducidos,  $\tau_{obs^{red}}$ . Estos últimos derivan de haberle aplicado correcciones al tiempo de llegada de la señal observada en cada antena debido a efectos que desvían su trayecto o modifican su velocidad de propagación. Esto es:

$$\tau_{obs^{red}} = \tau_{obs} + \text{correcciones} \quad (3.9.13)$$

Las causantes de estas correcciones pueden ser las alteraciones que el instrumento produce sobre la señal, como por ejemplo, las variaciones en las propiedades geométricas de la antena. También, se debe considerar el retardo producido, tanto por la ionósfera como por la tropósfera seca, que cambian la velocidad de propagación de la señal haciendo que su tiempo de llegada se modifique.

Finalmente se debe realizar la siguiente resta (los desarrollos de cada término se presentarán en las siguientes secciones con las ecuaciones 3.9.22 y 3.9.28):

$$l_{r0} = \tau_{apriori} - \tau_{obs^{red}} \quad (3.9.14)$$

Una vez hecha la diferencia entre ambos retardos sobre todas las observaciones, se calculan mediante mínimos cuadrados las correcciones que se le deben aplicar al modelo teórico inicial para que se aproxime mejor a la realidad, mediante el ajuste de la ecuación de observación (se presentará en las siguientes secciones en la ecuación 3.9.29). Luego, el modelo obtenido puede ser utilizado como un nuevo modelo inicial para calcular nuevos retardos teóricos y ser comparados con los observados. De esta manera y en forma iterativa, estableciendo algún criterio de corte, se busca aquel modelo que mejor aproxime a la situación real.

Expresando lo dicho en forma matricial, tenemos:

$$A \cdot dx = l + v \quad (3.9.15)$$

$$\begin{bmatrix} A_{r0} \\ A_{p0} \end{bmatrix} \cdot dx = \begin{bmatrix} l_{r0} \\ l_{p0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{r0} \\ v_{p0} \end{bmatrix} \quad (3.9.16)$$

donde  $A_{r0}$  está compuesta por las derivadas primeras de la función utilizada para calcular los retardos teóricos con respecto a los parámetros, evaluadas en los parámetros del modelo inicial.  $A_{p0}$  corresponde a una matriz de restricción, cuyo objetivo es acotar la variabilidad de los parámetros. También, tenemos que  $l_{r0}$  es la diferencia entre ambos retardos y  $l_{p0}$  está rellena, generalmente, con 0, para hacer uso de la restricción. Además, en la resolución se adiciona una matriz diagonal  $P$  de pesos para las observaciones (Böhm *et al*, 2014), siendo esta la inversa de la matriz de varianza y covarianza de las dichas observaciones,  $P = \Sigma_Y^{-1}$ .

Los parámetros de interés geodésicos los podemos obtener de  $dx$  que es la diferencia entre los parámetros del modelo teórico inicial y de los parámetros nuevos a estimar a partir de las observaciones. Para ello, se debe minimizar la suma del cuadrado de los residuos,  $v_{r0}$  y  $v_{p0}$ , que poseen una distribución gaussiana, concluyendo en la siguiente resolución:

$$dx = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (3.9.17)$$

donde  $(A^T P A)$  debe ser invertible.

No obstante, los parámetros que podemos obtener de estos cálculos, a partir de  $dx$ , son aquellos nombrados en el primer párrafo de esta sección, es decir las coordenadas de las fuentes y de las antenas, los EOP y aquellos otros denominados parámetros auxiliares, como son los asociados a los patrones de tiempo usados para la medición o los relacionados con la tropósfera que veremos con más detalle en las siguientes secciones.

### 3.9.2. Cálculo del retardo a priori o teórico

Las coordenadas a priori de los radiotelescopios son inicialmente tomadas de algún marco de referencia terrestre, y llevadas a la época de observación mediante un modelo de velocidades y de deformación cortical, como aquellos que tienen en cuenta la deformación producida por las mareas terrestres, las mareas polares o los efectos de carga.

En la ecuación del cálculo del retardo 3.1.1, el vector línea de base,  $\vec{b}$ , y aquel versor que da la dirección de las fuentes,  $\vec{k}$ , al encontrarse generalmente expresados en sistemas de referencia distintos, uno en el terrestre y el otro en el celeste, respectivamente, deben ser llevados a uno en común. Es por eso que en lo siguiente veremos como transformar a  $\vec{b}$  hacia el BCRS para que de esta manera pueda hacerse comparable con  $\vec{k}$ .

Considerando lo mencionado en el párrafo anterior, en la ecuación 3.1.1 deben introducirse ciertas transformaciones acordes, de tal manera que se tenga en cuenta la precesión, la nutación, la rotación terrestre y el movimiento del polo, como fue visto en el capítulo 2. Entonces, esta queda expresada de la siguiente manera:

$$\tau(t) = t_2 - t_1 \quad (3.9.18)$$

$$\tau(t) = -\frac{Q(t) \cdot R(t) \cdot W(t) \cdot \vec{b} \cdot \vec{k}}{c} \quad (3.9.19)$$

(Nothnagel, 2023) donde,  $t_2$  y  $t_1$ , son los tiempos de llegada de la señal a cada antena.  $W(t)$ ,  $R(t)$  y  $Q(t)$ , son las matrices de rotación que tienen en cuenta el movimiento del polo, la rotación terrestre, la nutación y la precesión, respectivamente, obteniendo de esta manera una transformación de  $\vec{b}$  hacia el GCRS.

Por otro lado, también, las coordenadas de las estaciones que se encuentran en  $\vec{b}$  en el GCRS tienen que ser llevadas al BCRS y por ello debe ser aplicada la siguiente traslación:

$$X_i(t_1) = X_g(t_1) + x_i(t_1) \quad (3.9.20)$$

donde la época de referencia es  $t_1$ , que generalmente es tomada cuando la señal llega a la primera antena.  $X_g$  es el vector posición del geocentro en el sistema baricéntrico,  $X_i$  son las coordenadas de las estaciones en el sistema celeste baricéntrico y  $x_i$  en el sistema celeste geocéntrico.

También, se deben considerar los efectos relativistas en la transformación. La escala de tiempo de ambos sistemas son diferentes y es necesario vincularlos. El tiempo que se mide en los radiotelescopios es dado por UTC, pero para trabajar con la ecuación 3.9.19 necesitamos referirlo al baricentro del sistema solar.

Al derivar UTC de TAI a través de una suma de segundos intercalares, como vimos en el capítulo 2, se puede utilizar TAI como escala de tiempo de nuestras observaciones. Luego, si a TAI le sumamos 32.184 s, obtenemos el Tiempo Terrestre (TT). Esta última escala de tiempo corresponde al que obtendríamos si midiéramos con relojes atómicos sobre el geode (notar la dependencia del tiempo con el potencial gravitatorio, por ello se debe transformar el tiempo entre marcos). Por lo tanto, TT varía igual que TAI, pero con una diferencia de 32.184 s.

El tiempo estándar para mediciones en el sistema de referencia geocéntrico celeste es el Tiempo Coordinado Geocéntrico (TCG), que se relaciona con TT mediante la siguiente ecuación (Bangert *et al.*, 2017):

$$TCG = TT + L_G \cdot (T_{JD} - TT_0) \quad (3.9.21)$$

TCG se da en fracción de días julianos,  $T_{JD}$  es TT expresado en días julianos,  $TT_0$  es 2443144.5003725 y  $L_G = 6.969290134 \times 10^{-10}$  (Petit y Luzum, 2010).

Finalmente, se puede obtener el tiempo coordinado en el baricentro, TCB, ya que se relaciona con TCG mediante una expresión matemática que depende del potencial gravitatorio de todos los cuerpos del sistema solar en el geocentro menos el de la Tierra, y de la posición y velocidad del geocentro en el sistema baricéntrico.

Ahora, estamos en condiciones de calcular el retardo teórico, ya que obtuvimos las coordenadas a priori de las estaciones en el mismo sistema inercial baricéntrico que  $\vec{k}$ , y podemos calcular  $\vec{b}$  en dicho sistema. Una corrección a tener en cuenta sobre este retardo, es la deflexión relativista que sufren las ondas electromagnéticas debido a que la fuerza gravitatoria de los cuerpos celestes desvían su trayecto. Si aplicamos esta corrección obtenemos el retardo en el vacío,  $\tau_{vacio}^{sb}$ , para el sistema baricéntrico.

Una vez que, con la ecuación 3.9.19 expresada en este sistema baricéntrico, calculamos el retardo teórico y habiendo corregido por flexión gravitacional, debemos volver a transformar dicha diferencia de tiempo al sistema geocéntrico para hacerlo comparable con los retardos observados en las estaciones. Para ello, se deben aplicar las transformaciones de Lorentz, tanto en los parámetros espaciales como en la escala de tiempo. Otro efecto a tener en cuenta durante esta última transformación es que en el intervalo de tiempo en que la señal tarda en llegar a la segunda antena después de llegar a la primera, la Tierra modifica su orientación debido, principalmente, a la rotación y por lo tanto, se debe considerar aberración a la aberración diurna. Finalmente, de esta manera se obtiene  $\tau_{vacio}$ .

Como queremos que el retardo calculado se aproxime lo más posible a la realidad, para calcular  $\tau_{apriori}$  se le debe añadir a  $\tau_{vacio}$  ciertas contribuciones que pueden modificar la diferencia de tiempo calculada y que se expresa en la siguiente ecuación (Nothnagel, 2023):

$$\tau_{apriori} = \tau_{vacio} + \Delta\tau_{aa} + \Delta\tau_{MT} + \Delta\tau_{MP} + \Delta\tau_{CO} + \Delta\tau_{CA} \quad (3.9.22)$$

donde,  $\Delta\tau_{MT}$ ,  $\Delta\tau_{MP}$ ,  $\Delta\tau_{CO}$  y  $\Delta\tau_{CA}$ , son las correcciones en los retardos teóricos por el efecto de la marea terrestre, la marea polar, la carga oceánica y la carga atmosférica, respectivamente, sobre la señal y  $\Delta\tau_{aa}$  es la corrección adicional debido a que no se tuvo en cuenta sobre el cálculo de la aberración diurna el efecto de retardo que produce la atmósfera sobre este fenómeno de aberración. En las siguientes secciones se explicará brevemente la causa de cada una de estas correcciones.

## Contribución de las mareas terrestres

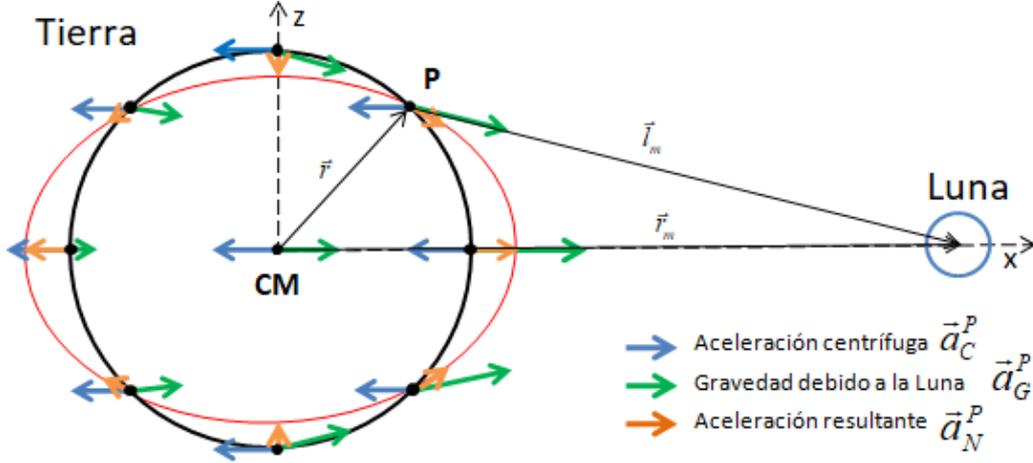
Los cuerpos celestes, principalmente la Luna y el Sol, ejercen fuerzas gravitacionales sobre todos los puntos de la Tierra. Además, considerando que esta revoluciona sin rotar, cada uno de estos puntos se ve igualmente afectado por la aceleración centrífuga proveniente del movimiento que poseen alrededor del baricentro del sistema de dos cuerpos que forma con cada astro.

Por otro lado, para que la Tierra mantenga, en equilibrio, su trayecto sobre la órbita alrededor de un cuerpo celeste, la aceleración centrífuga en su centro de masas,  $\vec{a}_C^{CM}$ , debe ser igual la aceleración producida por la fuerza gravitacional ejercida por dicho cuerpo en ese mismo punto, pero en sentido opuesto, de tal manera que la aceleración terrestre perpendicular a la órbita sea nula y que la Tierra conserve el mismo trayecto orbital. Tomando como el origen de nuestro sistema de referencia el centro

de masas terrestre, esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\vec{a}_C^{CM} = -\frac{GM_m \vec{r}_m}{r_m^3} \quad (3.9.23)$$

donde  $M_m$  y  $\vec{r}_m$  son la masa y la posición geocéntrica de la Luna, respectivamente, y  $G$ , la constante de gravitación universal. Como mencionamos en el primer párrafo, la aceleración centrífuga en cada punto  $P$ ,  $\vec{a}_C^P$ , será igual a  $\vec{a}_C^{CM}$  sobre toda la Tierra.



**Figura 3.3:** Esquema de fuerzas actuantes sobre la Tierra involucradas en las mareas (Torge, 2001).

Por otra parte, la aceleración gravitacional,  $\vec{a}_G^P$ , variará según la distancia que tenga cada punto  $P$  al cuerpo celeste y como  $\vec{a}_C^P$  se mantiene constante, esta suma de aceleraciones no será nula en toda la Tierra excepto en su centro de masas. Esto se reduce a que la aceleración neta en cada punto  $P$  resulta en la siguiente expresión (Torge, 2001):

$$\vec{a}_N^P = \frac{GM_m \vec{l}_m}{l_m^3} - \frac{GM_m \vec{r}_m}{r_m^3} \quad (3.9.24)$$

donde  $\vec{r}$  es la posición geocéntrica de  $P$  y  $\vec{l}_m = \vec{r}_m - \vec{r}$ , como se muestra en la figura 3.3.

Esta fuerza adicional asociada a  $a_N^P$ , produce una modificación sobre el potencial terrestre caracterizado por un desarrollo de armónicos esféricos. Dicha modificación viene dada por el potencial de mareas,  $\Delta V$ .

Los efectos de las mareas pueden ser descriptos por tres factores adimensionales,  $k$ ,  $l$  y  $h$ , llamados números de Love & Shida, quienes describen el comportamiento anelástico de la Tierra frente al potencial de mareas. Si modelamos a la Tierra como esférica, no rotante, elástica e isotrópica, el potencial terrestre,  $V(\theta, \phi)$ , frente a las fuerzas de mareas, se verá modificado con la adición de un potencial gravitatorio igual a  $kV(\theta, \phi)$ . Además, la altura geopotencial se desplazará  $hV(\theta, \phi)/g$  en la dirección radial y sufrirá un desplazamiento horizontal  $l(\vec{\nabla}_h V(\theta, \phi)/g)$ . Muchas veces estos números vienen acompañados por los subíndices  $n$  y  $m$ , que nos indican a que término de grado  $n$  y orden  $m$  del desarrollo del potencial de marea, potencial de mareas,  $\Delta V$ , en armónicos esféricos debemos aplicarlos para calcular su efecto (Agnew, 2007).

Si a este modelo le agregamos la rotación y le permitimos ser anelástico, los números de Love se verán afectados por la nutación libre del núcleo, fenómeno que proviene de la combinación de los efectos de la elipticidad del límite manto-núcleo y de la rotación de la Tierra haciendo que el manto y el núcleo líquido tengan un movimiento de precesión uno con respecto al otro. La anelasticidad del manto convierte a complejos los números de Love y los hace dependientes de la frecuencia por

dispersión anelástica. Además, la elipticidad y la rotación terrestre convierten a los modos esferoidales a modos toroidales en el potencial de mareas y como resultado, los números de Love se vuelven algo dependientes de la latitud. En conclusión, estos números tienen una fuerte dependencia tanto con la frecuencia como con la latitud (Petit y Luzum, 2010), e implican un desplazamiento en el orden del decímetro para la superficie de la Tierra sólida.

### Contribución de la carga oceánica

Las mareas producen una redistribución de las masas oceánicas, y consecuentemente, una variación del efecto de carga sobre la Tierra sólida del orden de unos muy pocos centímetros. Dicho efecto corresponde a la subsidencia de la superficie terrestre debido a ciertas fuerzas provenientes, en este caso, del peso de las masas oceánicas.

Cuando no se efectúan fuerzas externas sobre el sistema tierra sólida-océanos, la posición del centro de masas de dicho sistema se mantiene fijo. La presencia de fuerzas mareales sobre los océanos produce una subsecuente redistribución de masas, dando como resultado una variación periódica de la posición del centro de masas oceánico. Este movimiento debe ser compensado por un movimiento del centro de masas de la tierra sólida, causando variación en las coordenadas de las estaciones.

La respuesta de los océanos frente a las mareas depende fuertemente de las condiciones locales. No existe una forma analítica para modelar este fenómeno, pero sí existen modelos que lo describen basándose en altimetría satelital.

La carga puede ser calculada a partir de la suma del aporte de cada armónico esférico del potencial de marea a esta. Este cálculo involucra la integración pesada de todas las alturas de marea de todo el océano.

Los desplazamientos en sus tres direcciones, finalmente, pueden ser expresados como una suma escalada de cosenos, cuyos argumentos y amplitudes dependen de cada sitio. La precisión con los que se calcula depende de los errores en la función de peso en la integración, de la representación de la costa y de los métodos numéricos utilizados. Pero el mayor error proviene del modelo de marea oceánica utilizada (Petit y Luzum, 2010).

### Contribución de la carga atmosférica

La atmósfera al calentarse causa variaciones de la presión sobre la superficie terrestre con períodos diurnos, semidiurnos y algunos de mayor frecuencia. Esta variación de presión induce movimientos en la superficie por efecto de carga. La amplitud de los desplazamientos es del orden del milímetro (Petit y Luzum, 2010).

También hay que tener en cuenta una corrección por el movimiento del geocentro debido a la redistribución de masas atmosféricas al igual que lo consideramos con las masas oceánicas.

### Contribución de la marea polar

Si tomamos  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  y  $\hat{z}$  como los ejes de un sistema de referencia inercial geocéntrico, la velocidad angular instantánea de rotación terrestre,  $\vec{\Omega}$ , puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\vec{\Omega} = \Omega[m_1\hat{x} + m_2\hat{y} + (1 + m_3)\hat{z}] \quad (3.9.25)$$

Donde  $\Omega$  es la velocidad angular media de rotación, y  $m_1, m_2, m_3$  son factores adimensionales. Si despreciamos  $m_3$ ,  $\vec{\Omega}$  producirá un cambio en el potencial centrífugo con respecto al de la velocidad

media igual a:

$$\Delta V(r, \theta, \lambda) = -\frac{\Omega^2 r^2}{2} \text{sen}(2\theta) [m_1 \cos(\lambda) + m_2 \text{sen}(\lambda)] \quad (3.9.26)$$

Donde  $\vec{r}$  es el radio vector desde el geocentro al punto donde se quiere determinar  $\Delta V(r, \theta, \lambda)$ .

Los desplazamientos de la superficie producidos por  $\Delta V$  pueden ser descriptos a través de los números de Love,  $h_2$  y  $l_2$  de la siguiente manera (Munk y MacDonald, 1960):

$$S_r = h_2 \frac{\Delta V}{g}, \quad S_\theta = \frac{l_2}{g} \partial_\theta \Delta V, \quad S_\lambda = \frac{l_2}{g \cdot \text{sen}\theta} \partial_\lambda \Delta V \quad (3.9.27)$$

donde  $S_r$ ,  $S_\theta$  y  $S_\lambda$  corresponden a dichos desplazamientos, que son del orden de los 2 cm en la dirección radial y unos pocos milímetros en la tangencial. Debemos considerar que la posición del polo medio, sufre una deriva de 10 *msa* por siglo (Petit y Luzum, 2010) produciendo una parte del cambio de este potencial centrifugo.

Más aún, la redistribución de masa oceánica debido a la marea polar produce un efecto de carga sobre la superficie terrestre del orden del milímetro en la dirección radial y de cientos de  $\mu m$  en la dirección tangencial.

### 3.9.3. Reducción de las observaciones

El observable en VLBI es el retardo de grupo de la señal entre dos antenas, que se encuentra afectado por causas indeseadas que hacen variar el tiempo de llegada de la señal, por los cuales debe ser corregida. Un origen de estas causas es el paso de la señal por la atmósfera. Donde podemos incluir los retardos por la atmósfera neutra hidrostática (aquí no se considera al vapor de agua, sino que es una atmósfera seca) y por la ionósfera, que producen un retardo  $\Delta\tau_{A.N^n}$  y  $\Delta\tau_{ion}$ , respectivamente, sobre la señal. Además, existen causas instrumentales como la deformación gravitacional de la antena que produce una variación  $\Delta\tau_{D.G.}$  o la expansión térmica de esta misma que le corresponde un  $\Delta\tau_{E.T.}$ . También, se debe tener en cuenta en la corrección, el tiempo en que tarda la señal en recorrer los cables,  $\Delta\tau_{inst.}$ . Por lo tanto, al final, tenemos que el retardo reducido será (Nothnagel, 2023):

$$\tau_{obs^{red}} = \tau_{obs} + \Delta\tau_{A.N^n} + \Delta\tau_{ion} + \Delta\tau_{E.T.} + \Delta\tau_{D.G.} + \Delta\tau_{inst} \quad (3.9.28)$$

Debemos considerar que dentro de  $\tau_{obs}$  se encuentran los errores de medición aleatorios.

Debido a que los relojes de las antenas no están sincronizados entre sí, los retardos calculados entre cada par de antenas estarán sesgados por este efecto. Esta desviación en los relojes es considerada como parte del  $\tau_{obs}$  a través de un término  $\Delta\tau_{reloj}$ . Luego, en el análisis se debe estimar su valor, al igual que se hace con los EOP. Para ello, se toma un reloj de referencia a partir del cual se calculan dichas desviaciones y se las modela con un polinomio de grado 2 o 3.

Lo mismo sucede con el retardo troposférico húmedo en el zenit, que es difícil de modelar y por lo tanto debe ser estimado en el análisis. Finalmente, la ecuación de observación queda (Nothnagel, 2023):

$$\begin{aligned} \tau_{obs} = & -\frac{1}{c} \cdot \vec{b} \cdot W(x_p, y_p) \cdot S(ERA) \cdot Q(X, Y) \cdot \vec{k} \\ & - \left[ \Upsilon_0^{(1)} + \Upsilon_1^{(1)} \cdot (t - t_0) + \Upsilon_3^{(1)} \cdot (t - t_0)^2 \right] \\ & + \left[ \Upsilon_0^{(2)} + \Upsilon_1^{(2)} \cdot (t - t_0) + \Upsilon_3^{(2)} \cdot (t - t_0)^2 \right] \\ & + m_w^{(1)} \cdot \mathcal{T}_{zw}^1 + m_w^{(2)} \cdot \mathcal{T}_{zw}^2 \end{aligned} \quad (3.9.29)$$

donde  $\Upsilon_i^{(j)}$  es el parámetro  $i$ , a estimar, del reloj de la antena  $j$ ,  $t_0$  es una época de referencia,  $m_w^{(j)}$  es la función de mapeo húmedo en la estación  $j$  (esta función se explicará en la subsección de Retardo troposférico) y  $\mathcal{T}_{zw}^j$  es el retardo troposférico húmedo a estimar en el zenit de la estación  $j$ .

En los siguientes apartados, se describirán las causas de las reducciones hechas en la expresión 3.9.28.

### Corrección por calibración del instrumento

La señal que recibimos con una antena VLBI sufre modificaciones desde que sale de la radiofuente hasta que llega al back-end. No sólo entra en juego el medio interestelar y la atmósfera sino también la electrónica.

En el momento en el que la señal ingresa por el feed horn se le inyecta un set de tonos espaciados por 1 MHz que se mezclan con el ruido y que sufren las mismas perturbaciones de la señal (Petrov, 2000). Pero debido a que estos tonos tienen amplitud, fase y frecuencia conocida, es posible reconstruir aquellos efectos que afectan la señal y así corregir la fase. Como cada banda de frecuencia introduce efectos electrónicos distintos, la calibración de fase se realiza de manera independiente para cada canal de frecuencia (Heinkelmann, 2013).

En algunos casos, no se dispone de estos tonos y el proceso se puede realizar manualmente, aunque no de manera tan satisfactoria.

Otra de las calibraciones necesarias es la del retardo de cable (calibración de cable) que refiere al retardo de la señal desde que pasa el punto de referencia hasta que es grabada. Este retardo se produce por variaciones de temperatura y dobladura de cables.

Un último efecto debe considerarse y es el retardo ocasionado por la polarización, conocido como “polarization leakage” (fuga de polarización) asociado a imperfecciones del polarizador y que provoca un retardo del orden de 1.6 ps. Si bien esto para VGOS es importante, para los Legacy puede considerarse despreciable (Bertarini *et al*, 2011).

### Retardo troposférico

Una señal electromagnética al pasar de un medio a otro con distinta velocidad de propagación se refracta cambiando su dirección. En el caso de la tropósfera al presentar un carácter no dispersivo provoca que la velocidad de cada una de sus fases sea igual a la velocidad de grupo,  $\vec{v}$ . Consecuentemente los coeficientes de refracción de grupo y de fase,  $n_g$  y  $n_f$ , también lo serán, siendo estos igual a  $n = c/v$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz.

La longitud del camino eléctrico,  $L$ , para un rayo que proviene en la dirección del zenit sufre un cambio igual a (Elgered, 1982):

$$\Delta L = c_0(t - t_0) = \int_S (n_g - 1) dz \quad (3.9.30)$$

donde  $c_0$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $t$  es el tiempo de propagación de la señal en la atmósfera y  $t_0$  es el tiempo de propagación de la misma señal por el mismo trayecto pero en el vacío. Por otro lado,  $S$  es el camino del rayo. Este cambio es del orden de 2.3 m para la atmósfera hidrostática al nivel del mar sufriendo gran variabilidad con la altura y desde unos pocos mm en los polos hasta 40 cm en regiones ecuatoriales para la húmeda.

Asumiendo simetría azimutal en la atmósfera neutra alrededor de la estación, el retardo troposférico,  $\Delta L(e)$ , que sufre un rayo proveniente de una dirección que posee un ángulo  $e$  con el plano del horizonte es:

$$\Delta L(e) = \Delta L^z_h \cdot mf_h(e) + \Delta L^z_w \cdot mf_w(e) \quad (3.9.31)$$

donde  $\Delta L^z_h$  y  $\Delta L^z_w$  son los retardos que sufre la señal en dirección al zenit debido a la atmósfera hidrostática y húmeda, respectivamente,  $e$  es el ángulo definido anteriormente, denominado como ángulo de elevación, y  $mf_h(e)$  y  $mf_w(e)$  son sus correspondientes funciones de mapeo, que proyectan en la dirección cenital la radiación proveniente desde cualquier dirección parametrizada por el ángulo  $e$ . Se han publicado distintas funciones de mapeo, pero la más popular ha sido la propuesta por Herring (1992) presentando la siguiente estructura, tanto para su parte seca como húmeda,

$$mf(e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\text{sen}(e) + \frac{a}{\text{sen}(e) + \frac{b}{\text{sen}(e)+c}}} \quad (3.9.32)$$

donde  $a$ ,  $b$ , y  $c$  son actualmente calculados a partir de modelos numéricos de clima.

El retardo hidrostático en el zenit,  $\Delta L^z_h$ , depende de la presión barométrica en el punto de referencia espacial de la antena VLBI, también, de su latitud y altura ortométrica (Davis *et al*, 1986). En cambio, calcular el retardo troposférico húmedo es mucho más complejo e inexacto, ya que involucra una integración de la presión de vapor y de la temperatura a través del camino del rayo, y el contenido de vapor de agua en la atmósfera es muy variable. Lo que se debe realizar es una estimación de este retardo en el zenit luego que las observaciones hayan sido corregidas con el modelo de contribución hidrostática (Nothnagel, 2023) como se puede ver en la expresión 3.9.29.

El retardo troposférico no es solo dependiente de la elevación de la observación, sino que también del azimut de donde proviene la señal. Esto es debido, principalmente, a la forma elipsoidal de la atmósfera y a la variación, en tiempo y espacio, de la refractividad (Landskron y Böhm, 2018a). Estas consideraciones no han sido tenidas en cuenta dentro de las funciones de mapeo vistas y por lo tanto, es muy importante corregir  $\Delta L(e)$  mediante algún modelo de gradiente azimutal.

Dicho modelo se puede determinar mediante el trazado de rayos a través de modelos numéricos de clima globales y constituye la suma de un término adicional al retardo calculado a partir de un  $\Delta L$  independiente del azimut, como se muestra en la siguiente expresión (Chen y Herring, 1997),

$$\Delta L(A, e) = \Delta L_o(e) + mf_g(e) (G_n \cdot \cos(A) + G_e \cdot \text{sen}(A)) \quad (3.9.33)$$

donde  $A$  es el azimut,  $\Delta L_o$  es la diferencia de camino sin considerar el gradiente,  $mf_g$  es el gradiente de la función de mapeo que modela las altas refracciones para elevaciones bajas donde el trayecto del rayo en la atmósfera es largo y  $G_n$  y  $G_e$ , son las componentes del gradiente en la dirección Norte y Este.

Tanto para las funciones de mapeo como para los gradientes, se pueden distinguir dos tipos de modelos: numéricos y empíricos. Los primeros son denominados discretos, que implican ciertos ajustes por mínimos cuadrados de la ecuación 3.9.32 o 3.9.33 a los trayectos de rayos trazados a través de modelos numéricos de clima, en una grilla regular. Los segundos parten su estimación de modelos discretos, pero finalmente dentro sus coeficientes se involucra adicionalmente información de modelos empíricos. Donde, además, se propone que  $G_n$  y  $G_e$ , o  $a$ ,  $b$  y  $c$  sean también función del tiempo (Landskron y Böhm (2018a) y Landskron y Böhm (2018b)).

## Retardo ionosférico

Como mencionamos en el apartado anterior, la señal electromagnética, según el principio de Fermat, sufre una desviación en su trayecto al pasar por medios de distinto índice de refracción, buscando hacer estacionario el tiempo que le toma recorrer el camino eléctrico entre dos puntos. En

cuanto a la ionósfera como medio, y en contraste con la trpósfera, este sí es un medio dispersivo, es decir, que la velocidad de propagación varía según la longitud de onda,  $\lambda$ , de cada una de las fases de la señal. Como consecuencia se da lugar a la dispersión de Rayleigh, que producirá distintos retardos en cada una de las componentes de la señal con distinta frecuencia.

El camino total eléctrico puede ser calculado como (Nothnagel, 2023),

$$L_p^{ion} h = \int_S n_{ph}^{ion} ds = S - \left( \frac{40.3}{\lambda^2} + \frac{74.1x10^6}{\lambda^3} \right) \int_S EC ds \quad (3.9.34)$$

Donde,  $\int_S EC ds = TEC$  es el contenido total electrónico,  $EC$  el contenido electrónico relacionado con la cantidad de electrones en la atmósfera y,

$$n_{ph}^{ion} = 1 - \left( \frac{40.3}{\lambda^2} + \frac{74.1x10^6}{\lambda^3} \right) \quad (3.9.35)$$

con esta expresión se puede calcular la diferencia de tiempo entre lo que tarda la señal en recorrer el camino en el vacío y el camino con un  $TEC$  determinado. El retardo producido por este efecto es del orden de unas cuantos picosegundos (Petit y Luzum, 2010) y puede removerse a primer orden a través de una relación lineal entre dos señales observadas como explicaremos más adelante.

### Deformación gravitatoria de la antena

Si aplicamos fuerzas a la antena, el paraboloide puede cambiar de forma, y por lo tanto su posición y orientación también lo harán, haciendo que el rayo desvíe su trayectoria inicial al llegar al paraboloide. Si inicialmente, tomamos la longitud,  $L$ , de un rayo paralelo al eje de la antena, que va desde un plano de referencia perpendicular a dicho eje y se refleja sobre el disco hacia el feed horn, luego de la deformación, el camino del rayo cambiará su longitud en  $\Delta L$ . Este cambio es una función,  $F$ , de la variación de distintos parámetros de la antena, que puede ser expresada de la siguiente manera (Clark y Thomsen, 1988):

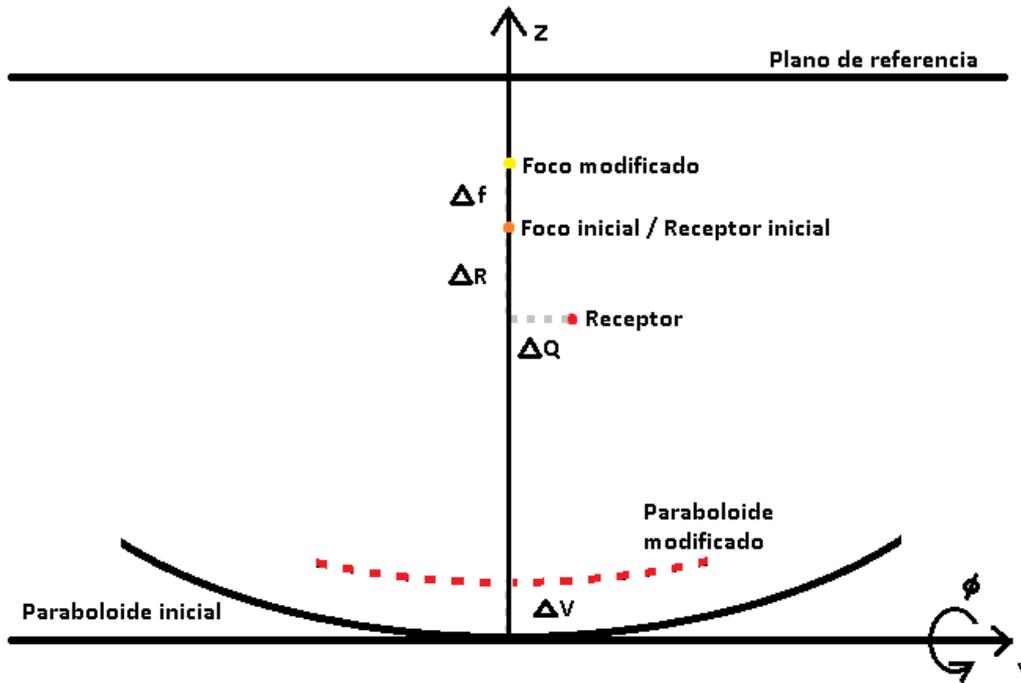
$$\Delta L = F(\Delta f, \Delta V, \theta, \phi, \Delta P, \Delta Q, \Delta R,) \quad (3.9.36)$$

donde  $\Delta f$ , es el cambio en la ubicación del foco,  $\Delta V$  es el cambio en la ubicación vértice del paraboloide,  $\theta$  y  $\phi$  son la rotación del plato con respecto al eje x e y, respectivamente, y  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$ ,  $\Delta R$  son cambios en la posición del receptor con respecto al paraboloide en la dirección de x, y y z, respectivamente, como se muestra en la figura 3.4.

Las derivadas con respecto a  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $P$  y  $Q$  de  $F$  son nulas en el origen (considerar el origen de los parámetros cuando la antena apunta hacia el zenit sin deformación), pues una variación positiva o negativa de dichas variables producen el mismo cambio en  $L$ . Entonces, si linealizamos la función  $F$ , tenemos (Clark y Thomsen, 1988):

$$\Delta L = \alpha_f \Delta f + \alpha_V \Delta V + \alpha_R \Delta R \quad (3.9.37)$$

donde  $\alpha_i$ , es la derivada de  $F$  con respecto a la variable  $i$ . A partir de aquí varios autores han publicado sus análisis sobre la deformación de las antena, basándose en la formulación anterior. Los coeficientes  $\alpha_i$  dependen exclusivamente de la geometría de cada radiotelescopio. Por ejemplo, aquellas antenas con un solo foco primario, los valores de  $\alpha_R$ ,  $\alpha_V$  y  $\alpha_f$  son 0,7, -1,7 y 0,3 según Abbondanza y Sarti (2010). Por otra parte, los valores de  $\Delta f$ ,  $\Delta V$  y  $\Delta R$  son medidos con diferentes sensores directamente sobre la antena (por ejemplo, los escáneres láser). Las mediciones se llevan a cabo posicionando a la antena en diferentes ángulos de elevación (Nothnagel, 2023).



**Figura 3.4:** Esquema de antena parabólica y sus desplazamientos por deformación (adaptado de Clark y Thomsen (1988))

### Expansión térmica de la antena

Existe un cambio en la altura del punto de referencia de la antena VLBI del orden de varios milímetros debido a cambios de temperatura (Le Bail *et al.*, 2013). Este desplazamiento es medido a partir de un punto medio de referencia con una temperatura media.

Por la ausencia de modelos que consideran una distorsión asimétrica de la antena, se supone que su estructura y sus componentes se expanden linealmente con la temperatura de forma simétrica. También, hay que tener en cuenta, que existe un lapso de tiempo entre el cambio de la temperatura y la respuesta de la antena frente a este que depende del material con la que fue construida. Wresnik *et al.* (2007) propuso el uso de modelos globales de temperatura y presión, basados en desarrollos de armónicos esféricos de bajo orden y grado de período anual para el cálculo de la deformación.

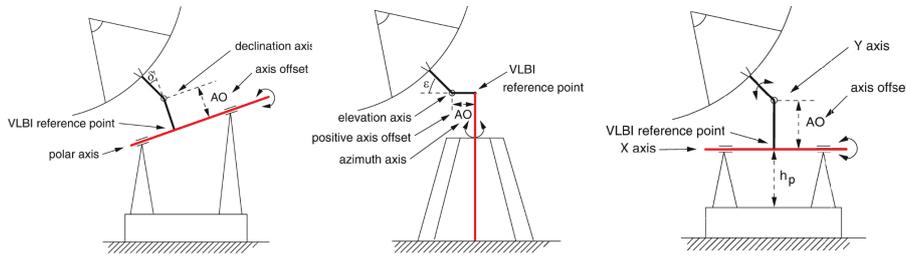
Las temperaturas de los materiales de los radiotelescopios en la época de observación, no están disponibles a menos que se tenga un conjunto de sensores montado sobre la antena. Si ese no fuese el caso, debe modelarse la deformación a partir de la temperatura ambiente y el tiempo en que ésta tarda en afectar la antena (Nothnagel, 2009).

### Retardo por desviación del eje

La intersección entre los dos ejes que poseen las antenas VLBI, idealmente, constituye el punto de referencia para las mediciones. Pero muchas veces estos ejes no se intersectan físicamente, entonces se define un nuevo punto de referencia para cada antena en particular, como se muestra en la figura 3.5. Esta desviación debe ser considerada en los retardos observados mediante la adición de un término dado por la siguiente expresión, (Nothnagel, 2009)

$$\Delta\tau_{AO} = \frac{1}{c}AO\sqrt{1 - (\vec{s} \cdot \vec{l})^2} \quad (3.9.38)$$

donde  $\vec{s}$  es la dirección de la fuente,  $\vec{l}$  es la dirección del eje fijo, que por ejemplo en las antenas con un eje azimutal y otro de elevación este corresponde al primero y están marcados con rojo en la figura 3.5, y  $AO$  corresponde a la distancia entre los ejes, denominada desviación de los ejes de las antenas (axis offset).



**Figura 3.5:** Esquema de antenas con desviación del eje (Nothnagel, 2009).

Consideremos, también, que este punto de referencia se desplaza por presión sobre la antena y deformación térmica en el orden de 1 mm.

### 3.10. Soluciones diarias y soluciones globales

Las soluciones del análisis pueden ser diarias o globales. En el primer caso los parámetros se obtienen para cada sesión de manera independiente mientras que en el segundo, la solución se obtiene de manera conjunta tal que algunos de los parámetros como las coordenadas pueden estimarse de manera implícita con información de varias sesiones.

#### 3.10.1. Soluciones diarias

Como hemos visto, todos los parámetros son calculados a través de un ajuste por mínimos cuadrados, obteniendo como resultado la desviación que se le debe aplicar a un modelo inicial para aproximarse a la realidad. Algunos de estos parámetros pueden ser estimados en función del tiempo representándolos como una función lineal continua a trozos para un período determinado, salvo aquellos relacionados con los relojes que son representados con una mediante una función cuadrática. Esto se logra a partir de un archivo que contiene los observables de una cierta sesión con el cual es posible determinar los valores de cada uno de los parámetros para la época de observación, aunque también, se pueden extrapolar y obtenerlos en épocas cercanas a la sesión.

Para estimar las coordenadas de las estaciones, debe ser definido un origen y una orientación del sistema de coordenadas. Esto puede ser hecho fijando las coordenadas al marco de referencia a priori o introduciendo las condiciones de no rotación (NNR) y de no traslación neta de la red (NNT) (Böhm *et al*, 2014). La condición de NNR se cumple cuando la suma de las velocidades de todos los puntos sobre la superficie terrestre multiplicados por su vector posición es nula. En cambio, la condición de NNT se refiere a cuando la suma de las componentes de desplazamiento en las 3 direcciones de todos los puntos es nula. Por otro lado, para estimar las coordenadas de las fuentes se aplica solo la condición de NNR.

Las soluciones de los distintos parámetros estimados durante el análisis se publican en un archivo denominado “Software de Intercambio Independiente” (SINEX) que puede contener las soluciones diarias de los distintos EOP, de los retardos trposféricos húmedos y de los parámetros del reloj, así como la matriz de varianza y covarianza de estas estimaciones.

### 3.10.2. Soluciones globales

En una solución global se estiman parámetros comunes para todas las sesiones a través de un ajuste que involucra los sistemas de ecuaciones de todas ellas, o equivalentemente, al resultado de sus soluciones diarias. Un ejemplo de estas son las reportadas por la Autoridad de Información Geoespacial (GSI) de Japón bajo el nombre *gsi2022a* con su descripción técnica (Takagi, 2022). Es esencial mantener al sistema lo mas reducido posible, para no sobrepasar la capacidad de almacenamiento y procesamiento de la computadora. Por esto, solo los parámetros de interés son mantenidos en las ecuaciones normales de las soluciones diarias, mientras que los demás son reducidos. Estos últimos pueden ser los parámetros del reloj, los retardos troposféricos y sus gradientes, que varían ampliamente en pocas horas. Por reducción entendemos que los parámetros son estimados implícitamente en el sistema de ecuaciones, como mostraremos a continuación.

La reducción se hace a partir de la partición del sistema de ecuaciones normales en dos partes tal como es expresado por Böhm *et al* (2014). Una de ellas contiene a los parámetros que se quieren reducir y en la otra, aquellos que no.

$$N_{11}.dx_1 + N_{12}.dx_2 = b_1 \quad (3.10.39)$$

$$N_{21}.dx_1 + N_{22}.dx_2 = b_2 \quad (3.10.40)$$

$dx_2$  contiene los parámetros reducidos, y la expresamos en función de  $dx_1$ . Despejando la ecuación 3.10.40, obtenemos:

$$dx_2 = N_{22}^{-1}.b_2 - N_{22}^{-1}N_{21}.dx_1 \quad (3.10.41)$$

Si reemplazamos la expresión 3.10.41 en 3.10.39. Llegamos a la forma,

$$N_R.dx_1 = b_R \quad (3.10.42)$$

donde  $N_R$  y  $b_R$  representan matriz y vector reducido. Luego, todos los  $N_R$  y  $b_R$  de cada sesión son apilados en  $N_G$  y  $b_G$ . Estos últimos, son los resueltos globalmente y se expresan de la siguiente manera:

$$N_G = N_{R_1} + N_{R_2} + N_{R_3} + \dots \quad (3.10.43)$$

$$b_G = b_{R_1} + b_{R_2} + b_{R_3} + \dots \quad (3.10.44)$$

Finalmente se obtienen los parámetros de interés invirtiendo  $N_G$ ,

$$dx_G = N_G^{-1}.b_g \quad (3.10.45)$$

La estimación global tiende a ser mucho más precisa que la solución diaria, porque involucra mucha más cantidad de datos respecto de la cantidad de incógnitas, permitiendo estimar o eliminar algunos errores.

## 3.11. Combinación con otras técnicas geodésicas

El Servicio Internacional para la Rotación Terrestre y los Sistemas de Referencia (IERS), mantiene y provee el ICRS e ITRS junto a sus materializaciones, ICRF e ITRF. También, entrega regularmente series de EOP.

Parte de sus componentes incluye a los centros de técnicas espaciales como el IVS, el Servicio Internacional de GNSS (IGS), el Servicio Internacional de SLR/LLR (ILRS) y el Servicio Internacional de DORIS (IDS). Cada una de las técnicas aportan al monitoreo de la orientación terrestre hecha por IERS. Gracias a la combinación pesada de las cuatro es posible obtener los EOP y materializar los sistemas de referencia terrestres. Cabe destacar que los sistemas de referencia celestes son materializados tan solo por VLBI (considerando solo estas cuatro técnicas geodésicas) y que esta aporta con un peso mucho mayor comparándola con las otras técnicas sobre la determinación de UT1 y de los offsets del polo celeste. En cambio, para la descripción del movimiento del polo tanto GNSS como SLR/LLR tienen mayor implicación.

## Capítulo 4

# VLBI en Argentina y el IGN

El IGN argentino es el encargado de producir y difundir la información geográfica de la República Argentina. Dentro de sus labores se encuentra la realización y el mantenimiento del marco de referencia nacional, POSGAR07, con la ayuda de la Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (RAMSAC), desarrollada por esta institución. Además, al IGN se le encomienda el sostenimiento de la red altimétrica y gravimétrica nacional, entre otros labores geodésicos.

Hace unos pocos años, dicho Instituto tuvo la iniciativa de comenzar a trabajar en el análisis de nuevas técnicas geodésicas, particularmente VLBI, de tal manera de involucrarse en el desarrollo de esta a nivel global.

### 4.1. Distribución de antenas VLBI en el mundo

La distribución de las antenas VLBI no es uniforme en todo el globo, debido a que existe una buena distribución de ellas en el hemisferio norte, y una muy pobre en el hemisferio sur.

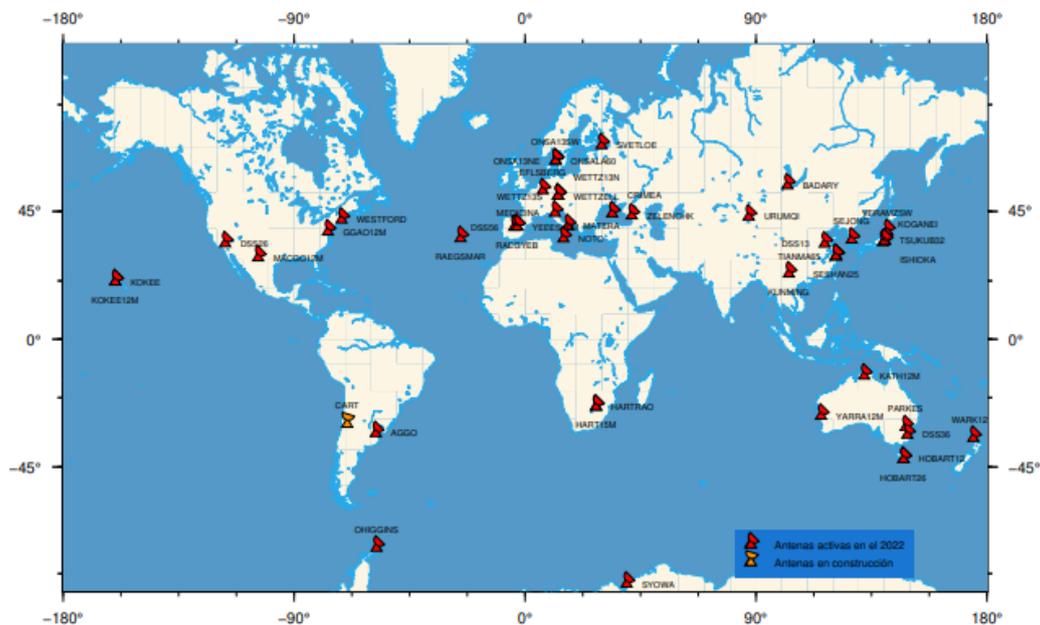


Figura 4.1: Red de estaciones activas en el 2022.

En el año 2022, aproximadamente alrededor de 35 estaciones estuvieron activas en el Norte (sin considerar el proyecto Very Long Baseline Array, VLBA), y 11 en el Sur, como se muestra en la

figura 4.1. Como resultado de esto, las estaciones en el hemisferio sur tienen menos observaciones por sesión que las estaciones en el hemisferio norte, concluyendo en una mejor realización de los marcos de referencia tanto terrestres como celestes en el Norte que en el Sur (de Witt *et al*, 2022). Por esta razón, es muy importante fomentar la instalación de observatorios geodésicos en Latinoamérica.

## 4.2. Situación actual de VLBI en América del Sur

Actualmente en Sudamérica existen dos estaciones VLBI asociadas a IVS y un solo centro de análisis, los cuales son detallados brevemente a continuación:

- Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO): AGGO es un observatorio geodésico fundamental que surge del esfuerzo conjunto entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de Argentina y la Agencia Federal Alemana de Cartografía y Geodesia (BKG). Este observatorio se ubica en la provincia de Buenos Aires, aproximadamente a 25 km de la ciudad de La Plata, cuyos datos generados aportan al desarrollo de la Infraestructura de Datos Espaciales del país.

AGGO cuenta con equipamiento VLBI, SLR y GNSS, además de máseres de hidrógeno, gravímetros y una estación meteorológica. La antena VLBI, cuyo código es homónimo al observatorio, está apoyada sobre una base de hormigón armado y cuenta con un plato de 6 m de diámetro, cuyo tamaño es más pequeño de lo normal, lo que la hace transportable.

Previamente a su ubicación actual, dicha estación se encontraba en Concepción, Chile, siendo parte del programa de IVS desde el año 2003 hasta el 2014 bajo el código TIGO. Luego, fue trasladada hacia Argentina, donde comenzó a participar de las observaciones de IVS en el año 2018.

- FORTLEZA: es una estación de la red de IVS, en la ciudad de Fortaleza, Brasil. Cuenta con una antena VLBI de 14.2 m de diámetro, pero no estuvo participando de las sesiones de IVS durante los años 2021 y 2022, pero si se espera que lo haga para el 2023.
- IGN: El IGN de Argentina cuenta con el único centro de análisis VLBI asociado a IVS en Latinoamérica. Esta institución trabaja en estrecha cooperación con AGGO. Se detallará mejor su labor en las próximas secciones.

También cabe destacar, que en el Observatorio Astronómico Félix Aguilar (OFA), en la provincia de San Juan en Argentina, se está llevando a cabo la construcción de una nueva antena VLBI que se resalta en naranja en el mapa 4.1.

## 4.3. VLBI en el Instituto Geográfico Nacional de Argentina

A partir de la instalación de AGGO, el IGN a través de un convenio con la BKG y el CONICET ha desarrollado el Centro de Investigaciones en Geodesia Aplicada (CIGA), siendo uno de sus objetivos procesar los datos obtenidos en el observatorio argentino-alemán.

El IGN viene operando el Centro de Procesamiento Científico de Datos GNSS de Argentina (CPC-Ar) para actualizar el Marco de Referencia Geodésico Nacional POSGAR07, desde el año 2005. En el año 2011, este Centro fue asociado al proyecto “Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas” (SIRGAS) como “Centro de Procesamiento Oficial de SIRGAS”. Con la creación de CIGA, CPC-Ar pasa a formar parte de él. Luego, se añadiría un centro de análisis VLBI dentro de este centro

de investigaciones geodésicas, y además, actualmente, se está trabajando con el objetivo de entregar productos provenientes de la técnica SLR.

En el año 2019, el IGN logró consolidar el centro de procesamiento de las observaciones de VLBI mencionado, que en abril del 2020 pasó a conformarse como un centro de análisis asociado al IVS. Gracias a esto, es el primer sitio con estas características de Latinoamérica, contribuyendo al avance del desarrollo científico en la región.

El grupo VLBI del IGN del cual formo parte, procesa regularmente y envía archivos SINEX para el proyecto de IVS “Soluciones diarias” (DSNX).

#### 4.4. VieVS: Software de análisis VLBI utilizado en el IGN

Actualmente existen alrededor de 10 softwares de análisis VLBI:

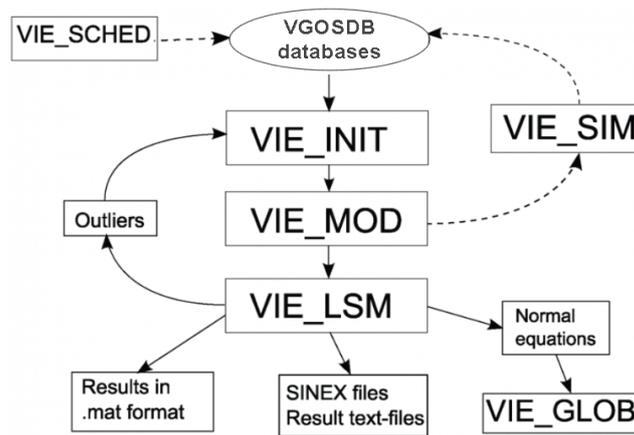
- CALC/SOLVE (John Gipson)
- c5++ (Grzegorz Kłopotek)
- DOGS-RI (Matthias Glomsda)
- GLORIA (Sébastien Lambert)
- MODEST (Chris Jacobs)
- OCCAM (Oleg Titov)
- PORT (Robert Heinkelmann)
- SteelBreeze (Sergei Bolotin)
- VieVS (Sigrid Böhm)
- Where (Ann-Silje Kirkvik)

El IGN utiliza el software científico denominado “Vienna VLBI and Satellite Software” (VieVS, Böhm *et al* (2018), desarrollado por la Universidad Tecnológica de Viena, en el departamento de Geodesia y Geoinformación. VieVS ha sido escrito en MATLAB y está estructurado con los siguientes módulos (figura 4.2):

- VIE\_INIT: involucra el proceso de inicialización, donde se preparan los datos de las sesiones provenientes de los archivos con formato VgosDB.
- VIE\_MOD: calcula los retardos teóricos y sus derivadas parciales, aplicando los modelos recomendados por el IERS.
- VIE\_LSM: se encarga de estimar los parámetros por medio de mínimos cuadrados.

El programa consta de una interfaz gráfica donde se puede seleccionar las sesiones a analizar y los modelos a usar.

En dicha interfaz podemos visualizar los errores en la determinación de cada línea de base para cada observación entre par de antenas. El programa muestra los residuos de la primera iteración de mínimos cuadrados, bajo el nombre de primera solución y los residuos de la última iteración, bajo el nombre solución principal, y a partir del cual se estiman todos los parámetros finales.



**Figura 4.2:** Flujo de trabajo de VieVS. (Gráfico modificado proveniente de Böhm *et al* (2018))

El analista puede elegir qué reloj de referencia quiere utilizar para estimar los parámetros de los demás relojes. El patrón de tiempo medido por cada uno de ellos puede sufrir discontinuidades (denominados saltos de reloj) que afectan a la estimación final de los parámetros, por los que deben ser corregidos por el analista indicándole al programa dónde se encuentran. Esta última corrección se hace en base a la observación de los residuos de la primera solución, ya que en este proceso solo se ha estimado una sola función continua para los patrones de tiempo de los relojes de cada estación y por lo tanto, dicho salto no fue corregido en su totalidad manifestándose en los residuos. Los relojes suelen modelarse con una función lineal continua más términos cuadráticos, siempre y cuando no haya saltos del reloj. Si este último fuese el caso, se los modela con varias funciones lineales, una antes y otra después de cada salto, más sus términos cuadráticos.

Dentro del análisis, también podemos eliminar observaciones, estaciones o líneas de base que consideremos que hayan introducido errores muy grandes a la estimación de los parámetros. Todo este análisis se realiza sobre la visualización gráfica de los residuos tanto de la primera como de la última solución.

De esta manera, el programa puede estimar la componente húmeda del retardo troposférico en el zenit, más sus gradientes norte y este. Así como también, se pueden estimar las desviaciones de los demás relojes con respecto a uno de referencia. Aunque, fundamentalmente, se estiman los parámetros de interés geodésicos como son los EOP, y las coordenadas de las fuentes y de las estaciones.

## 4.5. Modelos utilizados en el IGN

Los modelos utilizados para el análisis realizado por el IGN, son aquellos recomendados por el IVS y el IERS durante el tiempo en que se procesó las sesiones utilizadas. Vale aclarar que debido a que a partir de noviembre del 2022 entro en vigencia ITRF2020, el IGN procesa en este Marco. Pero, las sesiones utilizadas en este trabajo fueron analizadas anterior a esta fecha con ITRF2014, de tal manera que nuestras soluciones siempre tuvieron la facultad de ser integradas a la rutina de combinación de IVS para esa época. A continuación, se describirán los modelos más importantes, utilizados para los estudios de este trabajo.

### 4.5.1. TRF: ITRF2014

ITRF2014 (Altamimi *et al*, 2016) es el marco de referencia terrestre adoptado por el IERS, previo a la realización de ITRF2020. Esta realización se llevó a cabo con las soluciones procesadas de

las 4 técnicas geodésicas, hasta la época 2015.0 para VLBI, SLR y DORIS, y hasta la época 2015.1 para GNSS. También, este marco es provisto de un modelo preciso de saltos cosísmicos y movimientos postsísmico.

El origen de ITRF2014 se sitúa de tal manera que no existe traslación con respecto al origen medio de la solución de ILRS-SLR para la época 2010.0. La escala y su variación se definen tal que no presentan diferencias a la solución determinada por VLBI y SLR en la época 2010.0. Por último, su orientación es tal que su rotación con respecto ITRF2008 resulta nula en la época 2010.0.

IERS provee una serie temporal de EOP para poder vincular ITRF con ICRF. Y además, otorga un modelo de velocidades verticales y horizontales, para cada una de sus estaciones con un error menor a  $0.2 \text{ mm/yr}$ , más un modelo preciso de saltos cosísmicos y movimientos postsísmicos para que el usuario pueda obtener las coordenadas de las estaciones en el marco de referencia terrestre para la época deseada.

#### 4.5.2. CRF: ICRF3

ICRF3 (Charlot *et al*, 2020) es la última realización del ICRS adoptado por la IAU en reemplazo de ICRF2 a partir del primero de enero del 2019, incorporando alrededor de 40 años de datos VLBI en las frecuencias 2.3 y 8.4 GHz, más 15 años de datos provenientes de observaciones en la frecuencia de 24 GHz y en la dual de 8.4/32 GHz, para estimar las posiciones de las radiofuentes.

En esta realización, se incorpora por primera vez la aceleración del sistema solar con respecto al centro de la galaxia.

ICRF3 está constituido por las posiciones de 4536 radiofuentes extragalácticas, de las cuales 303 son identificadas como fuentes de definición que sirven para definir la orientación de los ejes del marco. Las posiciones son dadas en la época 2015.0 y deben ser propagadas a la época de interés teniendo en cuenta que la aceleración galactocéntrica es de  $0,0058 \text{ msa/yr}$ .

#### 4.5.3. A priori EOP: IERS C04

IERS ofrece los valores de EOP resultantes de la combinación pesada de las cuatro técnicas geodésicas para épocas que parten desde 1962. Dicha combinación es muy importante para mitigar los errores sistemáticos que cada una de ellas posee al determinar los parámetros citados.

Nuevos valores de EOP en la serie C04 distribuida por el IERS son agregados diariamente. La estimación para las 0 horas de un día estará disponible 30 días después. La serie IERS EOP C04 es considerada como la definitiva, sin embargo, en caso de grandes errores, estos pueden ser corregidos y presentados en los boletines publicados por el IERS llamados Bulletin B (Bizouard *et al*, 2017). Este último es actualizado por el Observatorio de París, los martes y los jueves.

En caso de necesitarse los valores de EOP antes de que sean publicados en la serie IERS EOP C04, determinaciones más próximas a las épocas de observación son dadas en el Bulletin A, donde además se adicionan predicciones con un año de anticipación (Luzum y Gambis, 2014).

En todos estos productos, los resultados son dados para las épocas correspondientes a las 0 horas de cada día con sus respectivos errores de estimación. Si se precisan los valores para épocas no consideradas en la serie se debe aplicar una interpolación Lagrangiana para obtenerla.

Los valores de EOP a priori utilizados por el IGN son los proveniente de la serie IERS 14 C04 (IAU2006/2000A), publicados por el IERS. Esta serie es consistente con le modelo de precesión y nutación IAU2006/2000A, por lo que no tiene en cuenta los efectos de las mareas oceánicas sobre el desplazamiento del polo por lo impuesto en la definición del CIP, quienes aportan períodos diurnos y semidiurnos al movimiento referido. Más aún, existen otros movimientos con períodos menores a 2 días

que no son considerados en el modelo de nutación IAU2000. Con este último movimiento aludimos a la libración. Esta se produce debido al torque ejercido por la Luna y el Sol sobre la parte no axialmente simétrica de la Tierra. Esta asimetría esta asociada a la diferencia entre los dos momentos principales de inercia menores (cuyas direcciones son cercanas al Ecuador) y que según se posicionen con respecto a la Luna y el Sol, el torque ejercido por estos cuerpos sobre la Tierra cambia lo que hará, también, variar a la posición del polo o a la velocidad de rotación. Como mencionamos, estos efectos han sido abstraídos de la serie entregada por el IERS, por lo que deberán adicionarse como términos de corrección siguiendo las recomendaciones hechas en las Convenciones 2010:

$$xp = xp_{IERS} + xp_{MO} + xp_{Lib} \quad (4.5.1)$$

donde  $xp_{IERS}$  es el valor de  $xp$  entregado por IERS,  $xp_{MO}$  es la corrección por marea oceánica y  $xp_{Lib}$  por libración. Análogamente, se aplica para  $yp$ .

Por otra parte, la definición de UT1 está basada en el CIO, como vimos en la sección 2.3.2, por lo que es sensible al modelo de precesión y nutación. Por lo tanto, UT1 también se ve afectado por variaciones diurnas y semidiurnas provenientes de las mareas oceánicas, que no son consideradas en los productos entregados por el IERS. Tampoco se tienen en cuenta los efectos de la libración, por lo cual ambos efectos mencionados deben ser adicionados de ser necesarios, al igual que hicimos con las coordenadas del polo,  $xp$  e  $yp$  (Petit y Luzum, 2010).

#### 4.5.4. Modelo de alta frecuencia de EOP: Desai & Sibois

El efecto de las mareas oceánicas sobre el movimiento polar, que mencionamos en la sección anterior, viene dado por la redistribución de masas que produce un cambio en el tensor de inercia de la Tierra, y que debe ser calculado a partir de la altura topográfica de la superficie oceánica. Además, otro efecto que produce inestabilidades en la rotación y en la orientación del eje terrestre, es el cambio relativo entre el momento de inercia del océano y de la Tierra sólida, que puede ser estimado a partir del modelado de las corrientes oceánicas producidas por las mareas. Para esto último, se aplica la ecuación de Laplace, que parte de la ecuación de la dinámica de fluidos para describir el flujo de la marea utilizando la altura topográfica de la superficie oceánica, y modelándolo como un fluido barotrópico, teniendo en cuenta la fuerza de Coriolis y de gravedad.

En el análisis VLBI del IGN, al momento de agregarle un modelo de alta frecuencia a los datos mencionados en el párrafo anterior, se utiliza el modelo de Desai & Sibois/Egbert quien usa datos tomados de mareas oceánicas provenientes del modelo TPXO.8 (Egbert y Erofeeva, 2002), cuyos resultados provienen de un procedimiento parecido al que se explicará en la próxima sección, 4.5.5.

Por otro lado, la libración se corrige como es recomendado en las Convenciones 2010 del IERS, donde se la expresa como una suma de 11 términos para UT1 y de 10 para el movimiento polar (Petit y Luzum, 2010).

#### 4.5.5. Modelo de carga debido a mareas oceánicas

En el análisis del IGN al momento de calcular la corrección por carga debido a mareas oceánicas en cada estación se utiliza el modelo de mareas oceánicas TPXO7.2 (Egbert y Erofeeva, 2002), proveniente de los modelos del tipo TPXO\*. Estos vienen dados por el mejor ajuste en el sentido de mínimos cuadrados de la solución a la ecuación de mareas de Laplace utilizando los datos promedios de los satélites TOPEX/Poseidon y Jason, dedicados a la medición de la topografía de la superficie oceánica. El modelo provee una descripción de las mareas a través de amplitudes, en forma compleja, de la altura del mar producida que producen 13 armónicos del potencial. Los resultados se

entregan en una grilla de 1440 x 721 , equivalente a, aproximadamente, 0.25 grados de resolución. Las mareas de menor longitud de onda son calculadas mediante interpolación spline.

#### 4.5.6. Modelo de marea polar

Para la estimación de la deriva polar y el subsecuente cálculo de la marea polar, se utiliza el polo medio convencional, representado por un modelo cúbico en el período 1976.0–2010.0 y una extrapolación lineal de éste para épocas mayores a 2010.0, asegurando continuidad. El modelo cúbico surge de un ajuste de datos provenientes del filtrado de la serie de IERS EOP C01 (Petit y Luzum, 2010). Y para finalmente calcular el desplazamiento de las estaciones deben ser utilizados los números de Love dados por las Convenciones 2010 del IERS.

La marea polar genera un cambio en la distribución de masas del océano, generando, también, un cambio en la carga oceánica. Desai (2002) presenta un modelo de equilibrio para esto, teniendo en consideración, por ejemplo, la línea de costas, la conservación de las masas oceánicas y la carga sobre el fondo oceánico.

#### 4.5.7. Modelo de carga atmosférica

El modelo de carga atmosférica parte de utilizar un modelo de clima global. En el caso del IGN, se utilizó el modelo de carga provisto por el Centro de Vuelos Espaciales de Goddard (GSFC), que se origina a partir del modelo de clima provisto por los Centros Nacionales de Predicciones sobre el Medioambiente (NCEP) de Estados Unidos y cuyos valores poseen un reanálisis cada 6 horas y una resolución espacial de 2.5° (Girdiuk *et al*, 2016).

En el GSFC se utiliza para definir el límite entre el continente y el océano, y así, evitar cambios bruscos en la transición entre ambos ambientes, aquella máscara proveniente del FES99 (Solución por Elementos Finitos), que es un modelo que describe las ondas oceánicas debido a las mareas usando la teoría de la hidrodinámica (Lefevre *et al*, 2002) .

#### 4.5.8. Modelo de precesión y nutación: IAU2006/2000A

El modelo IAU2000A (Mathews *et al*, 2002), denominado MHB2000, se basa en la serie de nutación REN2000 (Souchay *et al*, 1999) que derivada de una Tierra rígida, sin embargo, mediante la aplicación de una función de transferencia puede ser llevada a una serie para una Tierra no rígida.

El modelo MHB2000, en contraste con la teoría de IAU 1980, tiene en cuenta las siguientes características de la Tierra: la anelasticidad del manto, la presencia de mareas oceánicas y el acoplamiento electromagnético del núcleo fluido externo con el manto y el núcleo sólido interno. Su eje de referencia es el eje de máximo momento de inercia de la Tierra en rotación estacionaria.

La serie de la nutación incluye 678 término lunisulares y 687 planetarios. Además, no se tiene en cuenta el efecto del FCN, que esta relacionado con la interacción entre el manto y el núcleo fluido.

Los parámetros del modelo IAU2000 se refieren a la época J2000.0.

El modelo de IAU2006 (Capitaine *et al*, 2003) modela a la precesión de la Eclíptica y del Ecuador, como un polinomio de grado 5 en función del tiempo. La variación en la precesión del Ecuador es consistente con el modelo de precesión IAU2000A por motivos de continuidad.

La precesión según IAU2006 ha sido calculada a partir de las ecuaciones de la dinámica que describen el movimiento del polo medio alrededor del polo de la Eclíptica, con un valor de referencia de  $\epsilon_0 = 84381.406''$  para la oblicuidad media de la Eclíptica en la época J2000.0. Además, el valor del aplanamiento dinámico que toma este modelo es bastante coincidente con el del IAU2000, pero

presentan una diferencia en el hecho de que, por ejemplo, el modelo IAU2006 toma en cuenta el cambio en el  $J_2$  con el tiempo, debido principalmente al rebote postglacial.

Las diferencias entre IAU2000 y IAU2006 provienen, esencialmente, del modelado de la precesión y muy poco en el de la nutación. Sin embargo, hay que hacer pequeñas modificaciones a la nutación IAU2000 para hacerla compatible con los valores de  $\epsilon_0$  y la variación del  $J_2$  que toma IAU2006 (Petit y Luzum, 2010). Por lo tanto, si se hacen estos ajustes al modelo IAU2000, este pasa a ser llamado IAU2006/2000A.

El modelo IAU2006/2000A puede ser expresado, finalmente, con un polinomio de grado 5 que describe el movimiento secular del CIP en X e Y, correspondiéndose con la posición del polo medio, más una expansión en series de Fourier para la diferencia entre el polo medio y el CIP (polo verdadero). De esta manera la precesión queda descrita por el polinomio y la nutación por la serie de Fourier.

Como se ha visto en el capítulo 2, si tenemos en cuenta el modelo IAU2006/2000A, la posición corregida del CIP en el marco celeste será:

$$X = X(\text{IAU2006/2000A}) + dX \quad (4.5.2)$$

$$Y = Y(\text{IAU2006/2000A}) + dY \quad (4.5.3)$$

donde  $dX$  y  $dY$  son los offsets del polo celeste que describen el apartamiento entre la observación y el modelo, y por lo tanto reflejan el efecto de FCN.

#### 4.5.9. Función de mapeo: Vienna Mapping Function 3

Para el cálculo del retardo troposférico hidrostático se utiliza el modelo discreto denominado “Función de Mapeo de Viena 3” (VMF3, Landskron y Böhm (2018b)), donde los coeficientes  $b$  y  $c$  de la expresión 3.9.32, son determinados a partir de un modelo empírico de la tropósfera. Se los propone como función del tiempo y son ajustados mediante mínimos cuadrados a datos de carácter empírico. Estos coeficientes son calculados para cada nodo de una grilla espacial, y luego, son representados mediante armónicos esféricos sobre la superficie terrestre de tal forma de ser considerados como función continua.

Para calcular  $a$ , se la despeja de la expresión 3.9.32 y se reemplaza  $b$  y  $c$  por los valores calculados anteriormente. También, se debe evaluar y reemplazar la función de mapeo,  $mf(e)$ , que se obtiene a partir del cálculo de los retardos obtenidos con algún modelo numérico de clima para cada nodo de la grilla y en 7 ángulos de elevación diferentes. De esta manera, por cada nodo se obtienen diferentes valores de  $mf(e)$  y por lo tanto,  $a$  debe ser ajustado con mínimos cuadrados.

Por otra parte, para el cálculo del gradiente de la ecuación 3.9.33 se utilizan los datos provenientes del modelo de clima del Data Assimilation Office perteneciente al GSFC de la NASA (Schubert *et al*, 1993). Dicho cálculo se basa en la integración vertical de los gradientes horizontales de refracción, que pueden ser calculados a partir de variables climatológicas (MacMillan y Ma, 1997).

#### 4.5.10. Efemérides: DE421

Se utiliza el modelo DE421 provisto por el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL), donde se presentan las efemérides de la Luna, el Sol, la Tierra y los demás planetas del sistema solar en el ICRF. Son determinadas con la ayuda de misiones espaciales y radares. En el caso de la Luna, sus efemérides son calculadas con LLR (Folkner *et al*, 2009). Este modelo puede ser tomado de la página del Sistema de Información sobre Datos de la Dinámica Cortical (CDDIS) mantenido por la NASA.

### 4.5.11. Ionósfera

La manera de reducir el retardo ionosférico es a partir de la observación de la señal en dos frecuencias distintas. Por ello, es importante el uso de las bandas S y X en VLBI.

El retardo de grupo en la banda X debido a la ionósfera viene dado por:

$$\Delta\tau_X^{ion} = (\tau_X - \tau_S) \cdot f_S^2 / (f_X^2 - f_S^2) \quad (4.5.4)$$

Los software como VieVS utilizan esta corrección a partir de la información del retardo ionosférico proveniente de los VgosDB (Böhm *et al*, 2014).

### 4.5.12. Modelo para las mareas terrestres

Para el cálculo de los desplazamientos debido a las mareas terrestres se utiliza un procedimiento de dos pasos según lo propuesto en las Convenciones del IERS 2010. El primero utiliza el potencial de marea desarrollado hasta grado 2 y valores nominales de los números de Love y Shida,  $h_{2m}$  y  $l_{2m}$ . Además, se incorpora la variación de la deformación en relación con la latitud, siguiendo la expresión propuesta por Mathews *et al* (1995) donde se ajusta estos coeficientes en función de ella. A los desplazamientos producidos por los términos de grado 2 del potencial de marea, también se le adicionan los del grado 3. Más aún, se le adicionan ciertas contribuciones fuera de fase con el potencial de marea.

Por otro lado, el paso 2 implica el cálculo de la dependencia de los números de Love y Shida con la frecuencia. También, se calcula las contribuciones sobre el desplazamiento fuera de fase de las mareas zonales. En este paso a diferencia del primero, en el que se trabaja en el dominio del tiempo, se lo hace en el dominio de las frecuencias.

El desplazamiento total calculado es la suma del paso 1 con el paso 2 (Petit y Luzum, 2010).

### 4.5.13. Correcciones de la antena

El efecto sobre la señal debido a la deformación de la antena es corregida en base a las propiedades físicas y geométricas de cada una de ellas. Esta información es provista por cada estación.

La corrección es hecha por una subrutina de VieVS, en base a la teoría de Nothnagel (2009), quien calcula los retardos producidos a partir de fórmulas presentadas en trabajos anteriores a su estudio (Nothnagel *et al* (1995), Haas *et al* (1999) y Skurikhina (2001)). Este retardo depende de la temperatura ambiente, del coeficiente de expansión térmica del material de la base y de la antena, de su geometría y de la desviación del eje. También, depende de la elevación de la antena y del camino efectivo de la señal entre el reflector y el feed horn.

## 4.6. Comparación con otros centros

### 4.6.1. Objetivo

El objetivo de este análisis es tener un control sobre los productos obtenidos por el IGN y verificar la calidad de sus resultados. Para ello, se realizó una comparación de su estimación de EOP, con los resultados de otros centros de análisis oficiales de IVS. Por otra parte, también se los comparó con la solución intertécnica del IERS que es la serie de largo período recomendada en su última resolución. De esta hemos tomado los valores publicados en el Bulletin B ya que corresponde exactamente a los últimos valores de la serie IERS EOP C04, libres de cualquier error (Bizouard *et al*,

2017). Por otra lado, la serie Bulletin B\C04 comprende un listado de valores diarios de EOP lo que facilitará la interpolación a las épocas requeridas.

#### 4.6.2. Selección de centros

Se han buscado entre los centros de análisis oficiales de IVS, aquellos cuyos datos son accesibles para el IGN y que durante el procesamiento hallan usado un software diferente al utilizado por nosotros. Por este motivo, hemos seleccionado los siguientes tres centros:

**BKG:** Agencia Federal de Cartografía y Geodesia de Alemania (BKG) es uno de los centros de análisis de tipo completo (full) de IVS que genera archivos SINEX de 24 horas, y además, analizan sesiones intensivas de 1 hora. También, entregan series de parámetros troposféricos. Por otro lado, generan soluciones globales para las realizaciones de los marcos de referencia globales.

**GFZ:** El Centro de Investigaciones Alemán para las Geociencias (GFZ) es un centro dedicado a la producción científica en Ciencias de la Tierra donde funciona el departamento de Geodesia donde se ocupan, entre otras cosas, de investigar sobre las Técnicas de Geodesia Espacial. En el año 2012, se establece en esta institución un grupo de VLBI, que actualmente conforma un centro asociado a IVS.

**NMA:** Este centro de análisis es operativo de IVS y es conducido por el Instituto de Geodesia de la Autoridad Cartográfica de Noruega (NMA). Logró ser un centro asociado en el año 2010 y ha desarrollado el software Where.

Los datos utilizados de estos centros han sido obtenidos del CDDIS, y corresponden a los SINEX diarios de las series `gfz2020b`, `nma2020a`, y a la serie de soluciones globales `bkg2020a.eoxy`. De este último elegimos su solución global porque las soluciones diarias de la BKG brindan los EOP según las convenciones IAU1980 (Bernhard, com. personal). En la tabla 4.1 se listan los principales modelos utilizados tanto por estos centros como por el IGN. De esta se desprenden algunas diferencias apreciables como lo son los EOP a priori, o las funciones de mapeo y otras no apreciables tales como que la solución ITRF2014 de BKG no coincide exactamente con versión publicada por el ITRF (Engelhardt, com. personal).

Centro	IGN	GFZ
Software	VieVS	PORT
Marco de Referencia Terrestre	ITRF2014	ITRF2014
Marco de Referencia Celeste	ICRF3	ICRF3
Función de mapeo troposférico	VMF3	VMF1
Modelo de carga oceánica	TPX07.2	FES2004
Modelo de deriva polar	LINEAR IERS2019	linear IERS20180201
Modelo de deformación térmica de antena:	Nothnagel	Nothnagel
Modelo de carga atmosférica:	GSFC	GSFC
Modelo de precesión/nutación:	IAU 2006/2000A	IAU 2006/2000A
A priori EOPs:	IERS C04 14	eop_finals2000A.txt
Modelo High Frequency EOP (HF-EOP):	Desai Sibois (2016)	Desai Sibois (2016)

Centro	NMA	BKG
Software	Where	Calc/Solve
Marco de Referencia Terrestre	ITRF2014	ITRF2014
Marco de Referencia Celeste	ICRF3	ICRF3
Función de mapeo troposférico	VMF1	VMF3
Modelo de carga oceánica	TPX07.2	TPX07.2
Modelo de deriva polar	mean pole 2015 model	IERS2022
Modelo de deformación térmica de antena:	Nothnagel	Nothnagel
Modelo de carga atmosférica:	IERS 2010 Conventions	GSFC
Modelo de precesión/nutación:	IAU 2006/2000A	IAU 2006/2000A
A priori EOPs:	IERS C04 14	eop_finals2000A.txt
Modelo High Frequency EOP (HF-EOP):	Desai Sibois (2016)	Desai Sibois (2016)

**Tabla 4.1:** Modelos utilizados por el IGN, GFZ, NMA y BKG.

## 4.7. Resultado de los análisis de diferentes centros

En los gráficos superiores de las figuras 4.3 a la 4.7, se muestran las estimaciones de los distintos EOP para los 4 centros mencionados (GFZ, NMA, BKG e IGN) junto a su dispersión ( $\sigma$ ). En cambio, los gráficos intermedios muestran las diferencias que cada centro tiene con la serie entregada en el Bulletin B por el IERS.

Para esta parte del estudio, se tuvieron en cuenta 44 sesiones comprendidas entre 2019 y 2020 en las que AGGO tuvo participación. Los nombres de los SINEX correspondientes a dichas sesiones se muestran en la tercer columna de la tabla del apéndice A. Estas fueron seleccionadas ya que serán algunas de las utilizadas en capítulos posteriores. La comparación se realizó de manera distinta para los distintos centros, en particular, porque las épocas para las que son estimados los parámetros difieren de centro a centro. Por ejemplo, las estimaciones del IGN son para las 0 horas de UTC, al igual que lo hace el IERS, mientras que el NMA y el GFZ estiman para algunas horas posteriores que varía dependiendo la sesión. Entonces, para que fueran comparables, se debió interpolar los valores de la serie del IERS mediante el método de Lagrange para las épocas de las estimaciones del GFZ y del NMA. Además de esto, tanto en las épocas del IGN como en las del GFZ y del NMA, los valores del IERS debieron ser corregidos en  $x_p$ ,  $y_p$  (X del polo e Y del polo, respectivamente) y en UT1-UTC, con el objetivo de adicionar a estos datos las variaciones diurnas y semidiurnas producidas por las mareas oceánicas, y las variaciones diurnas producidas por libración como fue explicado en la sección 4.5.3. El cálculo de las primeras correcciones se realizó a través del programa `eop_eanes.m` de VieVS que sigue el procedimiento hecho por Eanes en 1997 en el código `ortho_eop.f` (Petit y Luzum, 2010), cuya base teórica es el modelo de Ray *et al* (1994). Para las segundas correcciones se utilizan 10 coeficientes que expresan la libración en el caso del movimiento del polo y 11 para UT1. Ambos procedimientos son los sugeridos en las Convenciones 2010 de IERS (Petit y Luzum, 2010), donde se ofrecen los códigos correspondientes, aunque los utilizados para este trabajo fueron adaptaciones de aquellos que corren en VieVS bajo el nombre de `pm_libration.m` y `ut_libration.m`. Cabe destacar, que antes de interpolar

UT1 con Langrange se debió quitarle el efecto de largo período que las mareas zonales producen sobre este parámetro y luego de la interpolación se las volvió a adicionar, con lo cual se utilizó para ello el código `rg_zont2.m` de VieVS recomendado por las convenciones de IERS en 2010 (Petit y Luzum, 2010).

Para el caso de la BKG, la serie elegida, `bkg2020a.eoxy`, es global y no siempre presenta sus estimaciones para el mismo día de las sesiones seleccionadas, por lo tanto la comparación se realizó en los días más próximos a estas sesiones en los cuales hay datos de la BKG. Las estimaciones de la serie del IERS debieron ser llevadas hacia las mismas épocas que las de la BKG con una interpolación lagrangiana (considerando el efecto de largo período que las mareas zonales tienen sobre UT1-UTC como en el caso anterior). Para este caso, no se han sumado los efectos diurnos y semidiurnos de las mareas oceánicas y de libración, ya que al estimar una solución global, los valores obtenidos están influenciados por todas las estimaciones hechas anterior y posteriormente, resultando de esta manera ser una serie de tiempo suavizada, perdiendo los efectos mencionados. Lo mismo pasa con la solución global de la GSI de Japón quienes reportan en su descripción técnica que su solución `gsi2022a` no contiene las contribuciones de las variaciones de alta frecuencia (Takagi, 2022).

Una vez hecha las restas, para cada serie se tomaron como outliers en las 44 sesiones analizadas y, por lo tanto, no se los consideró en los cálculos, aquellos valores que difieran del valor medio más de 3 veces la desviación estándar ( $\sigma$ ) en su diferencia con respecto al IERS. Para el NMA no se tuvo en cuenta durante la realización de estos cálculos en  $dX$ ,  $dY$  y UT1-UTC a las estimaciones presentadas en el SINEX 19APR15XA por dar valores muy distintos y se los eliminó a priori.

En los gráficos medios de las figuras 4.3 a 4.7, a la izquierda, se muestran los valores medios de las diferencias que cada centro tuvo con el IERS en línea punteada. También, se representa la desviación estándar de dichas diferencias con barras verticales de largo  $2\sigma$  y centro en el valor medio. En los gráficos inferiores se aprecia lo anterior con una mejor escala para facilitar la observación y el análisis de los valores.

De los gráficos 4.3 al 4.7 se desprende lo siguiente según cada EOP:

**xp:** Para la coordenada  $x_p$  del movimiento del polo podemos notar que la amplitud de su variación es aproximadamente 193 msa. Además, mediante la observación de los datos graficados se puede evidenciar una variación de período aproximadamente anual en el movimiento.

Las diferencias del IGN con el IERS tienen un valor medio de  $-0.059$  mas, cuatro órdenes de magnitud menor que la amplitud del movimiento en  $x_p$  del polo. Por otra parte, se puede notar que ningún centro presenta outliers en su diferencia.

**yp:** Se puede ver que la amplitud de la variación de la coordenada  $y_p$  del polo es de aproximadamente 165 msa. Al igual que  $x_p$ , también se manifiesta el un período aproximadamente anual en el movimiento.

El valor medio de las diferencias del IGN con el IERS es de 0.046 msa, que sigue siendo cuatro órdenes de magnitud menor que la variación del parámetro.

En estas diferencias calculadas con el IERS, el GFZ y la BKG presentan solo 1 outlier sobre los 44 valores obtenidos en cada centro.

**UT1-UTC:** Para UT1-UTC, los valores varían aproximadamente entre  $-44$  y  $-245$  ms, y le corresponde una variación de aproximadamente 200 ms en 1 año y medio. El valor medio de las diferencias del IGN con el IERS es de  $-0.0154$  ms, 5 órdenes de magnitud menor que la amplitud de la variación del parámetro.

Estas diferencias calculadas con el IERS, tan solo el NMA presenta 1 outlier y la BKG 2 en su solución global de las 44 sesiones analizadas.

**dX:** En la nutación, los valores de  $dX$  varían aproximadamente entre  $-0.5$  y  $0.5$  msa, y le corresponde una amplitud en su variación de aproximadamente 1 msa. Las diferencias con el IERS, se mantienen por debajo del valor de la amplitud. El valor medio de las diferencias que tiene el IGN con el IERS es de  $-0.042$  msa.

Con respecto a las diferencias calculadas con el IERS, el IGN presenta 1 outlier y el NMA, 2 en los 44 resultados obtenidos.

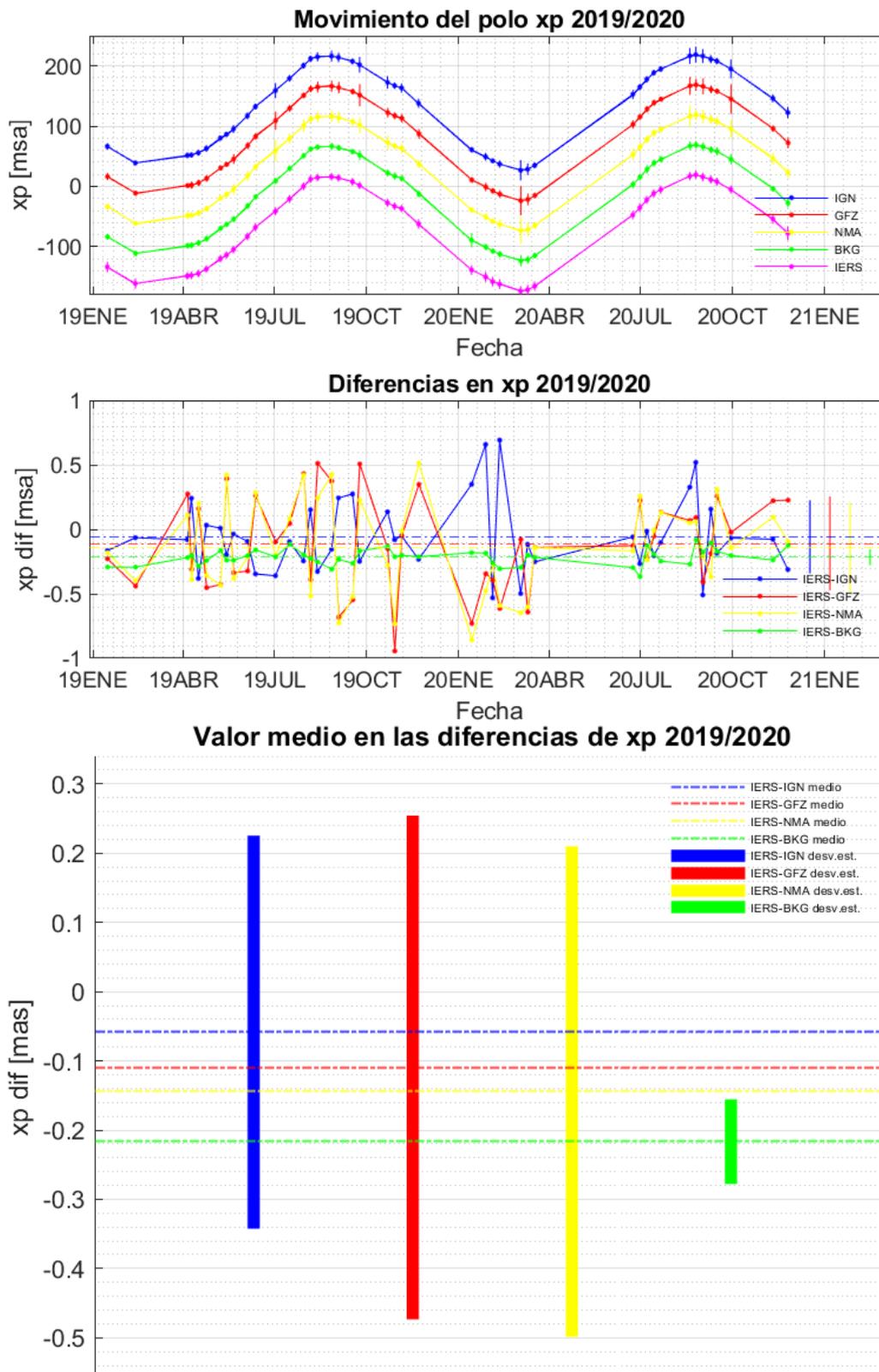
**dY:** Para  $dY$  en la nutación, los valores varían aproximadamente entre  $-0.3$  y  $0.8$  msa, y le corresponde una amplitud de aproximadamente 1.1 msa. Las diferencias con el IERS, de valor medio para el IGN de  $-0.017$ , se mantienen por debajo del valor de la amplitud de la variación.

Con respecto a los outliers de las diferencias, el GFZ presenta un outlier y NMA, 2 en las 44 sesiones analizadas.

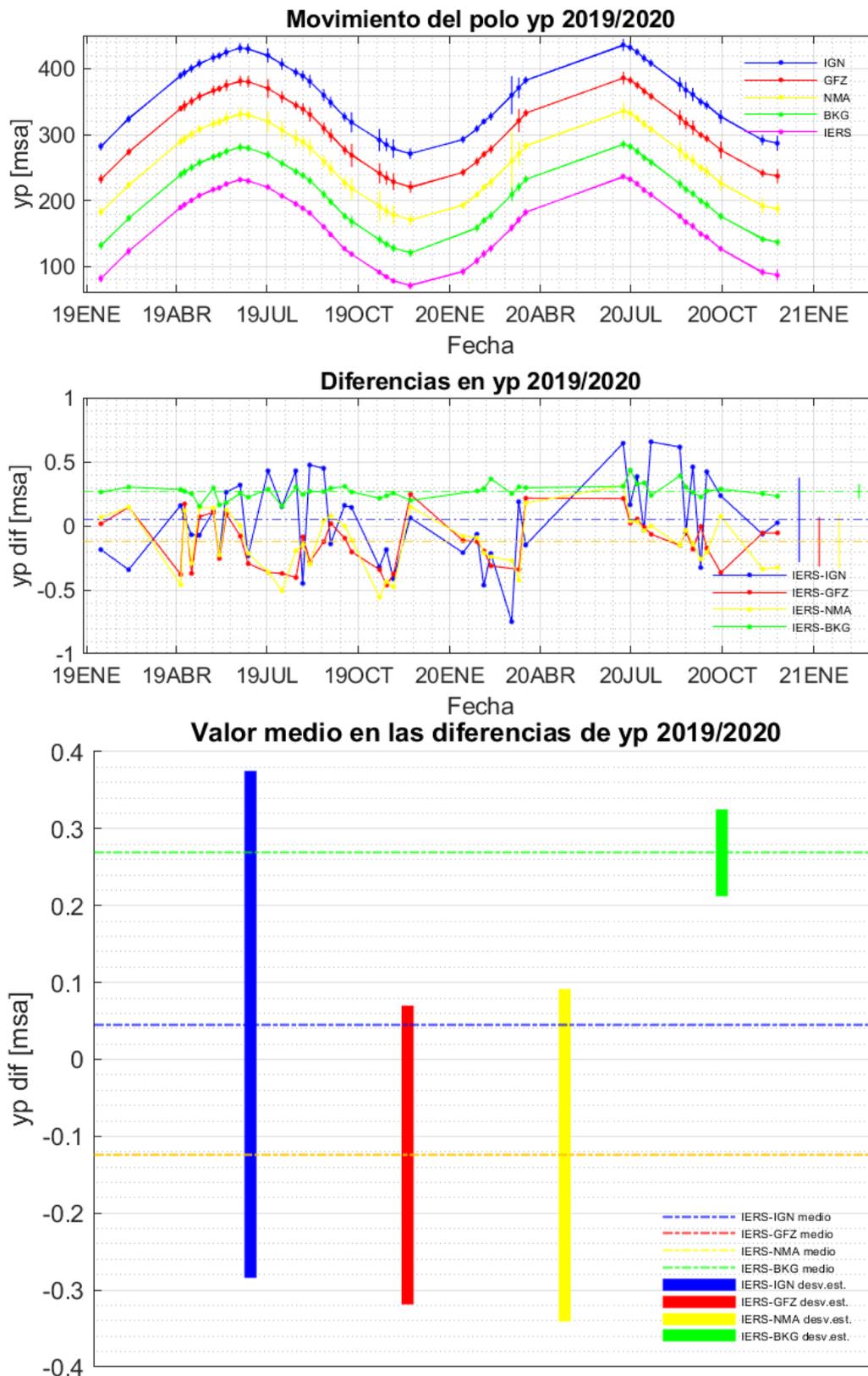
Otro punto que me parece de suma importancia mencionar es la dispersión que posee cada centro al estimar cada parámetro. Sus valores máximos se muestran en la tabla 4.2. Donde dicha desviación es menor para el IGN que para el GFZ y el NMA en  $x_p$ , UT1-UTC y  $dY$ . Con lo que respecta a los otros parámetros, el IGN nunca presenta el mayor valor. Pero, por otra parte, la desviación obtenida por la BKG es siempre menor, lo que equivale a decir que su precisión es mayor. Esto se puede deber a que la serie analizada proviene de una solución global. También, se puede observar en los gráficos superiores de las figuras 4.3 a la 4.7, que las barras de dispersión que acompañan a las estimaciones son más grandes o más pequeñas para todos los centros en la misma época de observación.

Desv.Est.	IGN	GFZ	NMA	BKG
$x_p$ [msa]	0.113	0.164	0.146	0.080
$y_p$ [msa]	0.193	0.117	0.297	0.067
UT1-UTC [ms]	0.0100	0.0145	0.7131	0.0073
$dX$ [msa]	0.200	0.246	0.110	0.047
$dY$ [msa]	0.102	0.152	0.106	0.046

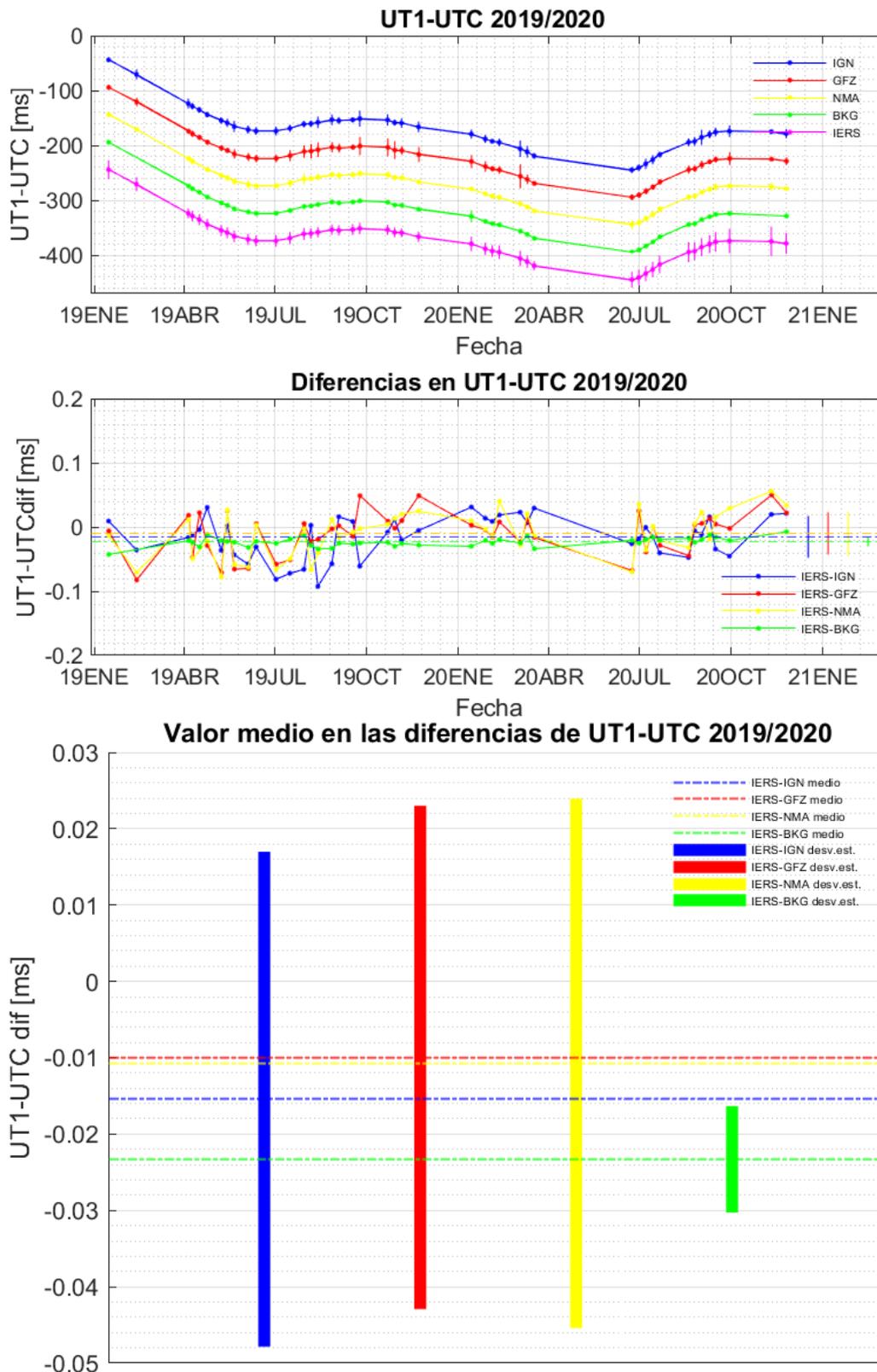
**Tabla 4.2:** Valores máximos de la desviación estándar en la estimación de cada parámetro hecha por los diferentes centros para la época analizada.



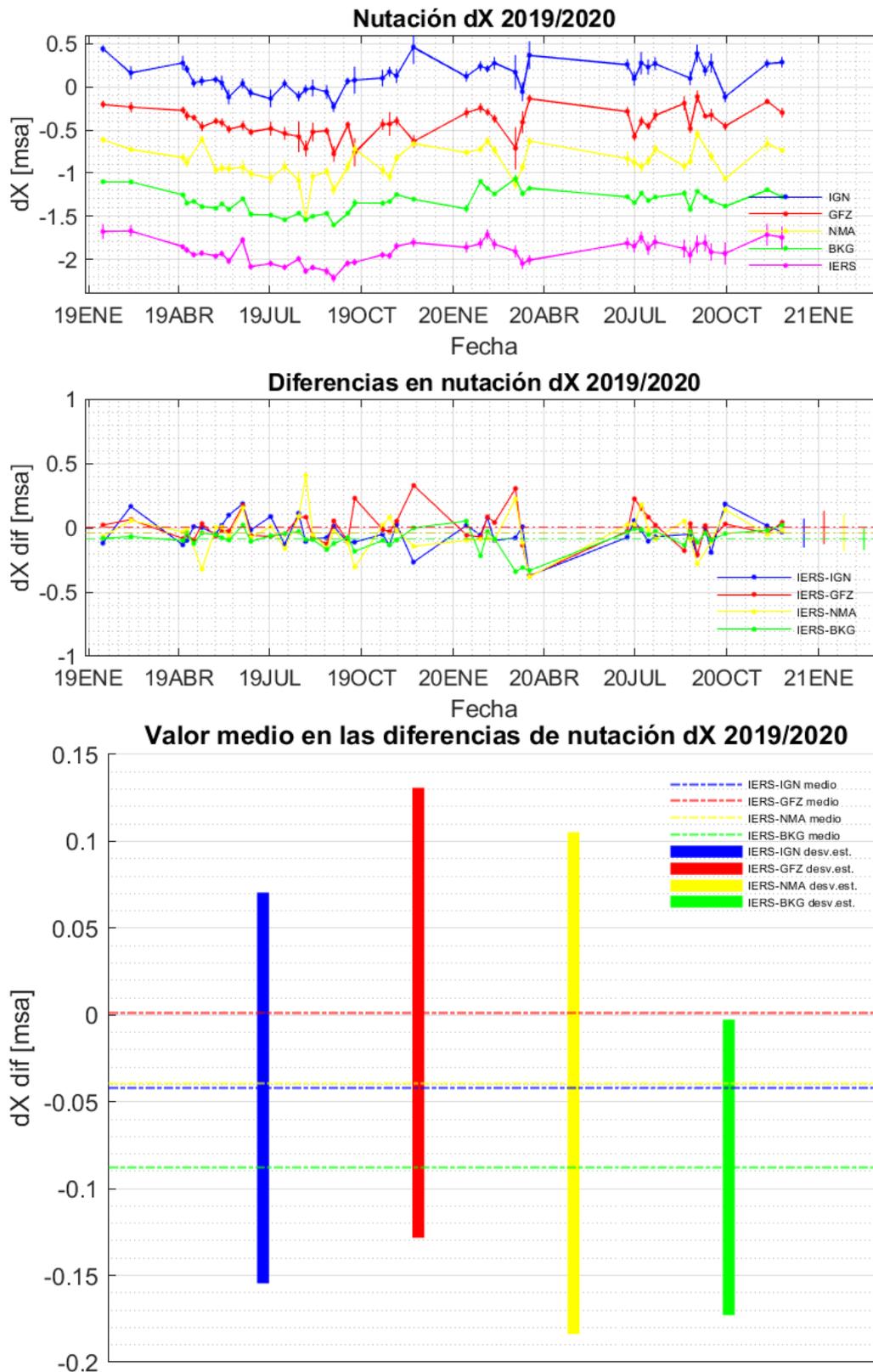
**Figura 4.3:** En el gráfico superior se encuentran las estimaciones de xp hecha por cada centro con sus barras de desvío (Las estimaciones del GFZ, NMA, BKG e IERS C04 fueron marcadas y desfasadas de sus valores reales en -50, -100, -150 y -200 msa respectivamente). En el medio se encuentran las diferencias de cada centro con la serie IERS EOP C04 (IAU2006/2000A). Y en el inferior se encuentra marcada la media y el desvío de las diferencias.



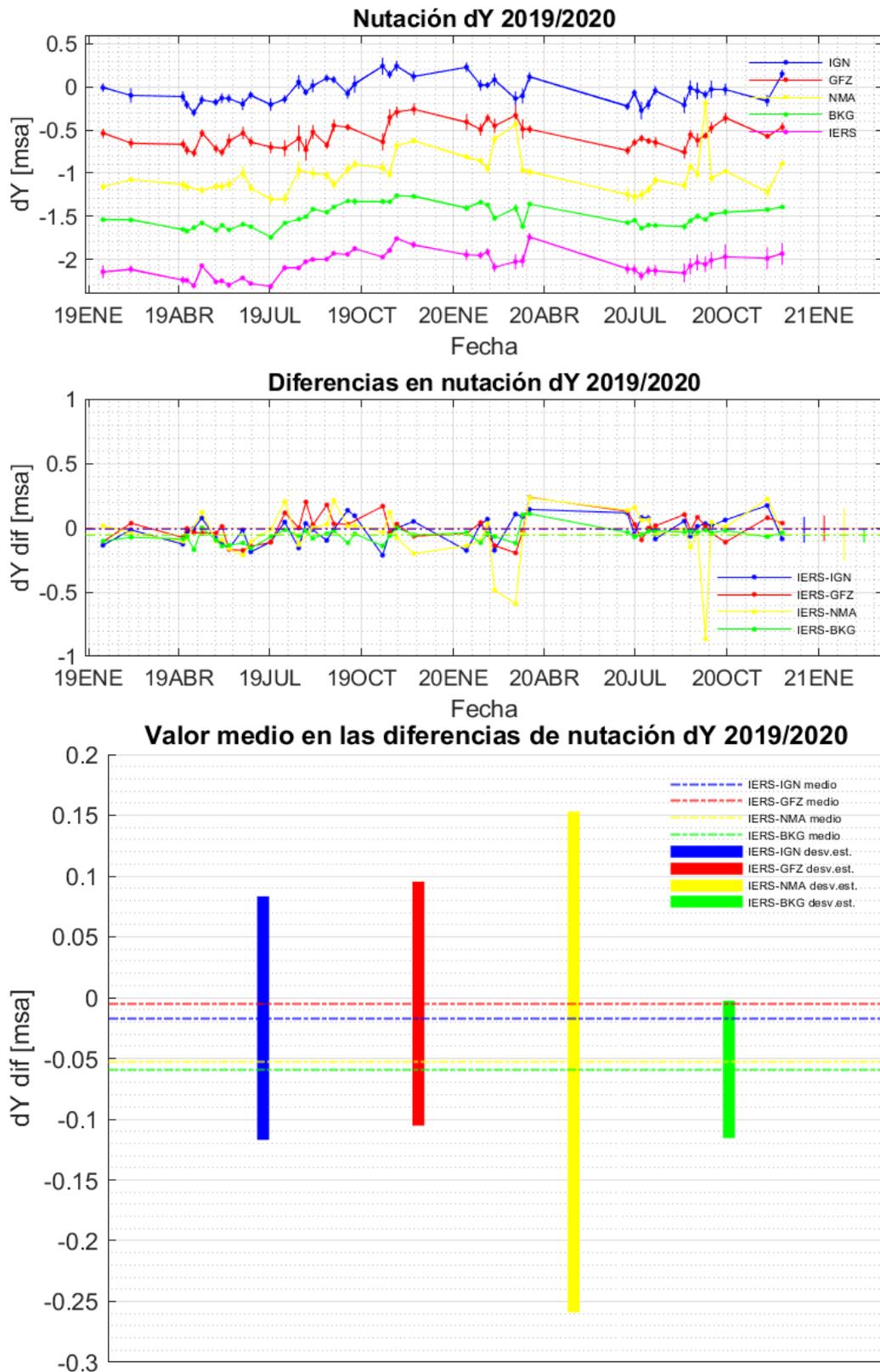
**Figura 4.4:** En el gráfico superior se encuentran las estimaciones de yp hecha por cada centro con sus barras de desvío (Las estimaciones del GFZ, NMA, BKG e IERS C04 fueron marcadas y desfasadas de sus valores reales en -50, -100, -150 y -200 msa respectivamente). En el medio se encuentran las diferencias de cada centro con la serie IERS EOP C04 (IAU2006/2000A). Y en el inferior se encuentra marcada la media y el desvío de las diferencias.



**Figura 4.5:** En el gráfico superior se encuentran las estimaciones de UT1-UTC hecha por cada centro con sus barras de desvío (Las estimaciones del GFZ, NMA, BKG e IERS C04 fueron marcadas y desfasadas de sus valores reales en -50, -100, -150 y -200 ms respectivamente). En el medio se encuentran las diferencias de cada centro con la serie IERS EOP C04 (IAU2006/2000A). Y en el inferior se encuentra marcada la media y el desvío de las diferencias.



**Figura 4.6:** En el gráfico superior se encuentran las estimaciones de  $dX$  hecha por cada centro con sus barras de desvío (Las estimaciones del GFZ, NMA, BKG e IERS C04 fueron marcadas y desfasadas de sus valores reales en -0.5, -1, -1.5 y -2 msa respectivamente). En el medio se encuentran las diferencias de cada centro con la serie IERS EOP C04 (IAU2006/2000A). Y en el inferior se encuentra marcada la media y el desvío de las diferencias.



**Figura 4.7:** En el gráfico superior se encuentran las estimaciones de  $dY$  hecha por cada centro con sus barras de desvío (Las estimaciones del GFZ, NMA, BKG e IERS C04 fueron marcadas y desfasadas de sus valores reales en -0.5, -1, -1.5 y -2 msa respectivamente). En el medio se encuentran las diferencias de cada centro con la serie IERS EOP C04 (IAU2006/2000A). Y en el inferior se encuentra marcada la media y el desvío de las diferencias.

#### 4.7.1. Análisis de las diferencias entre los centros y el IERS

En la tabla 4.3 se muestran, los valores medios de las diferencias de cada centro con respecto al IERS y el error medio de cada parámetro entregado por el Bulletin B para los meses del período considerado.

Valores medios	IGN	GFZ	NMA	BKG	Error medio IERS
xp [msa]	-0,059	-0,110	-0,144	-0,217	0,049
yp [msa]	0,046	-0,124	-0,125	0,269	0,034
UT1-UTC [ms]	-0,0154	-0,0100	-0,0107	-0,0233	0,0088
dX [msa]	-0,042	0,001	-0,039	-0,088	0,065
dY [msa]	-0,017	-0,005	-0,053	-0,059	0,059

**Tabla 4.3:** Valores medios en la diferencia de cada centro con el IERS .

En base a la examinación de la tabla 4.3, notamos que los valores medios de las diferencias en ambas coordenadas del polo para todos los centros, es mayor que el error medio entregado por el IERS, siendo el IGN quien presenta menor apartamiento. Dicha desviación puede deberse a que otras técnicas como GNSS aportan con un peso significativo a la determinación de xp e yp en la combinación intertécnica, entonces es posible la presencia de diferencias significativas entre la serie del IERS y las que provienen sólo de VLBI, más allá de si utilizamos soluciones diarias o globales.

Para UT1-UTC ocurre exactamente lo mismo, y si bien sería de esperar que aquí se destaque la técnica VLBI, para brindar una respuesta concluyente hubiera sido necesario analizar las sesiones Intensivas del IVS, destinadas a la obtención de UT1-UTC, mientras que en este trabajo sólo se han considerado las sesiones de rápida respuesta (R1 y R4).

Por otro lado, para dX y dY, en el caso de las soluciones diarias del IGN, el GFZ y el NMA, este valor medio es menor que el error medio del IERS, sin embargo en el caso de la solución global de la BKG es igual o mayor. Más aún, sus valores medios son siempre mayores en todos los EOP, pero veremos más adelante a que se lo podemos atribuir.

Por otro lado, en la tabla 4.4 se muestra la desviación estándar que tiene cada centro en su diferencia con el IERS, lo que nos indica qué tan consistentes son las estimaciones en su apartamiento y que dispersión poseen. Por otro lado, si tenemos en cuenta las barras de desviación graficadas en las sección inferior de las figuras 4.3 a 4.7, podemos observar que en algunos casos la dispersión del IGN es menor que la de los demás centros (sin mirar a la BKG que es una solución global y es de esperar que tenga siempre menor dispersión en estas diferencias con el IERS), pero en otros casos lo es el del GFZ o del NMA.

Dispersión	IGN	GFZ	NMA	BKG	Precisión IERS
xp [msa]	0,284	0,364	0,354	0,061	0,049
yp [msa]	0,330	0,194	0,216	0,056	0,034
UT1-UTC [ms]	0,0324	0,0330	0,0347	0,0070	0,0088
dX [msa]	0,113	0,130	0,145	0,085	0,065
dY [msa]	0,100	0,100	0,206	0,056	0,059

**Tabla 4.4:** Desviación estándar en las diferencias con el IERS.

Notar en los gráficos de la derecha que todas las barras de desviación estándar se superponen unas con otras para los diferentes parámetros y que tanto para el IGN como para el GFZ y el NMA dichas barras cruzan por la diferencia 0, dando a entender que en algunos casos las diferencias con el IERS pueden ser positivas, y en otros negativas o cero. Asimismo, la barra del IGN siempre incluye al valor medio del GFZ y del NMA, y viceversa, concluyendo que algunas de las estimaciones de IGN son más parecidas a las del IERS que las que tienen los otros dos centros. Por otra parte, para la BKG,

no sucede esto mismo siempre y se evidencia un bias en su estimación de todos los parámetros. Esto puede deberse a lo mencionado sobre el marco de referencia a priori, ya que el marco de referencia usado por la BKG no es exactamente ITRF2014, puesto que, por ejemplo, las coordenadas a priori de la antena NOTO se apartan 9 cm de aquella en ITRF2014 (Engelhardt, com. personal). Otra posible explicación de dicha desviación podría ser la restricción aplicada a las fuentes de definición del ICRF al momento de realizar la solución global.

#### 4.7.2. Análisis de las diferencias entre los centros

En la tabla 4.5, se presentan los valores medios de las diferencias entre el IGN y las soluciones diarias de los demás centros. Aunque, no ha sido posible la resta directa entre las estimaciones del IGN con los demás, si se pudo calcular su media haciendo la diferencia entre los valores medios que tenían cada uno con el IERS. Esto esta demostrado en el apéndice B. Estas discrepancias con NMA y GFZ, excepto en las coordenadas del polo, es menor que el error medio del IERS y por lo tanto, podrían ser despreciables. Mas allá de que en la estimación de las coordenadas del polo no se pueda hacer la misma consideración, en este caso el IGN presenta un menor apartamiento con relación a la solución intertécnica como vimos en la sección 4.7.1.

Valores medios	Dif. IGN-GFZ	Dif. IGN-NMA	Dif. IGN-BKG
xp [msa]	0,051	0,086	0,158
yp [msa]	0,170	0,170	-0,223
UT1-UTC [ms]	-0,0055	-0,0047	0,0079
dX [msa]	-0,043	-0,003	0,046
dY [msa]	-0,012	0,036	0,042

**Tabla 4.5:** Media de las diferencias del IGN con los demás centros.

Por otro lado, se estimó la desviación estándar que poseerían las diferencias entre el IGN con los demás centros. Dicha estimación viene dada por la siguiente expresión 4.7.5, demostrada en el apéndice B:

$$\sigma_{ab} = \sqrt{\sigma_{ac}^2 + \sigma_{bc}^2 - 2 \frac{\sum_{i=1}^N [(a_i - c_i) - \mu_{ac}] [(b_i - c_i) - \mu_{bc}]}{N - 1}} \quad (4.7.5)$$

donde  $a$  representa los valores de EOP del IGN,  $b$  el de algún otro centro y  $c$  del IERS. Por otra parte los subíndice  $ab$ ,  $ac$  y  $bc$  indican que los parámetros (la media,  $\mu$  y la desviación estándar,  $\sigma$ ) están calculados para las diferencias de los respectivos centros.

Cabe aclarar que si pudiéramos realizar la comparación directa entre los centros, la expresión 4.7.5 podría ser utilizada sin ningún problema. Sin embargo, en el caso de este estudio en particular, para realizar el cálculo de  $\sigma_{ab}$  fue necesario suponer que las estimaciones del IGN y de los otros centros se hacen en las mismas épocas, lo cual no es cierto ya que difieren en algunas horas. Esta suposición, introduce error en el cálculo de  $\sigma_{ab}$  que proviene del factor  $(b_i - c_i)$ , y cuyo valor será representado por  $dB_j = (b_i - c_i) - (b_j - c_j)$  donde  $i$  son los índices que indican las épocas del IGN y  $j$  los de las épocas del centro con el cual se esta comparando. Por propagación de errores, el error,  $d\sigma_{ab}$ , en la desviación estándar debido a todos los  $dB_j$  de todas las épocas es igual a:

$$d\sigma_{ab} = \frac{\sum_{j=1}^N |(a_j - c_j) - \mu_{ac}| dB_j}{(N - 1)\sigma_{ab}^2} \quad (4.7.6)$$

Esta expresión, 4.7.6, es demostrada en el apéndice B.

Con la ecuación 4.7.5 se estimó la desviación estándar que tiene la diferencia del IGN con el NMA y el GFZ, encontrándose estos valores en la tabla 4.6.

Desv.Est.	Dif.IGN-GFZ	Dif.IGN-NMA	Precisión IERS
xp [msa]	0,55 (0,013)	0,54 (0,013)	0,049
yp [msa]	0,38 (0,007)	0,35 (0,006)	0,034
UT1-UTC [ms]	0,037 (0,0007)	0,037 (0,0007)	0,0088
dX [msa]	0,15 (0,008)	0,14 (0,008)	0,065
dY [msa]	0,12 (0,007)	0,21 (0,012)	0,059

**Tabla 4.6:** Desviación estándar estimada en las diferencias del IGN con NMA y GFZ. Entre paréntesis, se presenta la diferencia máxima que puede poseer la discrepancia entre el IERS con GFZ o NMA calculada época de estimación de dichos centros, con aquella que debería resultar en la época de estimación del IGN para que el error en la estimación del desvío sea menor 0,005 msa o 0,0005 ms

Por otra parte, debemos considerar que los  $\sigma_{ab}$  presentados en la tabla 4.6 presentan cierto error  $\pm d\sigma$  como explicamos anteriormente.

Ya que no podemos estimar o acotar este error, pues no sabemos cuánto es el valor de cada  $dB_j$ , nos propusimos encontrar el error máximo que pueden tener los  $B_j = b_j - c_j$  para que la precisión de la desviación estándar sea menor que  $d\sigma_{ab}^* = 0.005$  msa en xp, yp, dX y dY, y  $d\sigma_{ab}^* = 0,0005$  ms en UT1-UTC. A este error máximo en cada  $B_j$  lo supondremos constante para todos los  $j$  y lo llamaremos  $dB$ . Luego, podemos aplicar la ecuación 4.7.7 explicada en el apéndice B.

$$|dB| = \frac{(N-1)\sigma_{ab}^2}{\sum_{j=1}^N |(a_j - c_j) - \mu_{ac}|} d\sigma_{ab}^* \quad (4.7.7)$$

Los valores de  $dB$  máximos para cada parámetro y diferencia se muestran en paréntesis en la tabla 4.6. De esta manera, si el error en todos los  $dB_j$  son menores que  $dB$  solo el segundo decimal de los  $\sigma_{ab}$  podría variar en  $\pm 1$ .

Los errores en cada  $dB_j$  deberían ser muy pequeños, inclusive menores que los presentados en la tabla 4.6, ya que la estimación en las dos épocas diferentes provendrían del mismo análisis de la misma sesión.

Por otra parte, también se realizó la estimación de la desviación estándar entre el NMA y el GFZ, cuyos resultados se presentan en la tabla 4.7.

Desv.Est.	GFZ-NMA
xp [msa]	0,14 (0,002)
yp [msa]	0,12 (0,004)
UT1-UTC [ms]	0,016 (0,0003)
dX [msa]	0,15 (0,007)
dY [msa]	0,19 (0,01)

**Tabla 4.7:** Desviación estándar en las diferencias entre NMA y GFZ.

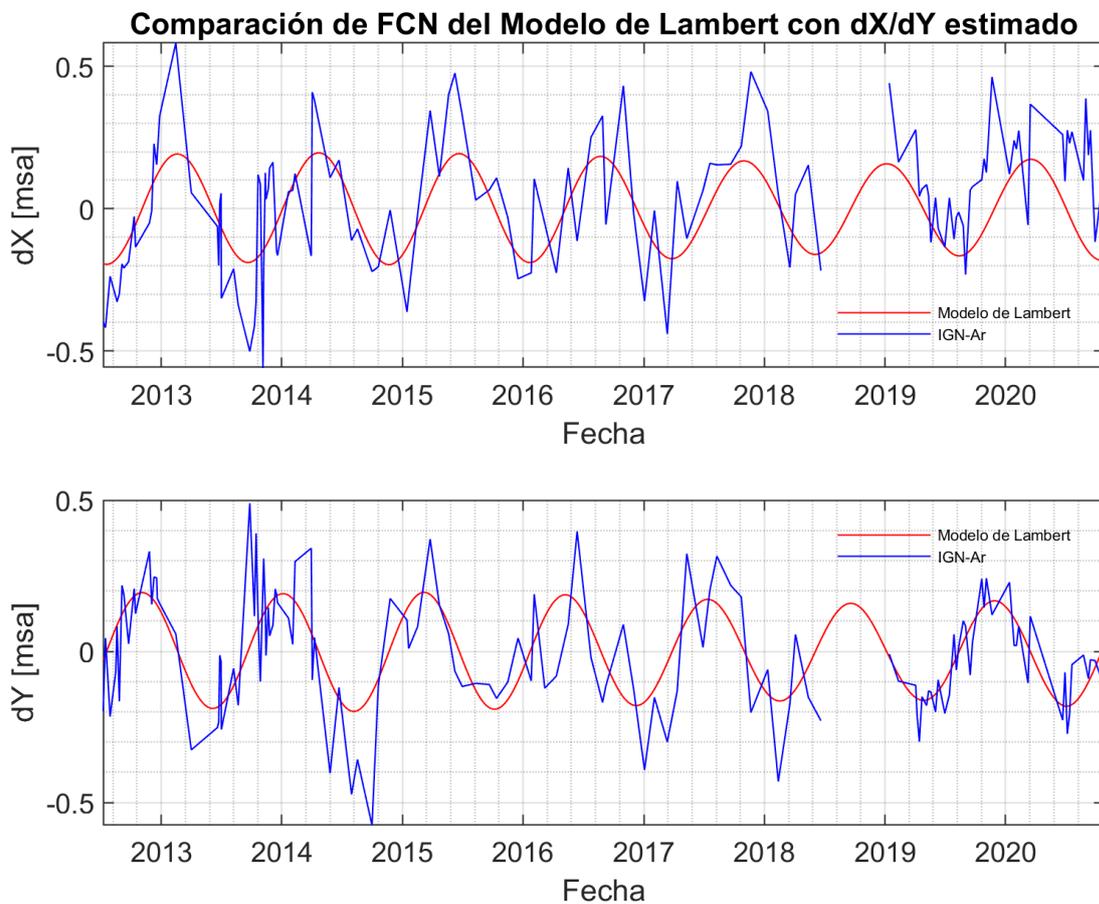
Podemos notar que los desvíos en las discrepancias entre el IGN y el NMA, así como entre el IGN y el GFZ, son similares en magnitud solo en dX y dY a los desvíos entre el NMA y el GFZ. Sin embargo, cuando se trata de las coordenadas del polo (xp e yp) y UT1-UTC, el desvío es mayor cuando se involucra el IGN.

Todas las diferencias vistas pueden venir dadas por diferentes motivos, por ejemplo, debido a los diferentes modelos utilizados, al tipo de solución obtenida, al software utilizado o por la pericia del analista. Dichos factores también provocan que el desvío en la estimación de cada EOP (tabla 4.2) difiera entre los análisis de los diferentes centros.

## 4.8. Presencia del efecto del FCN en los datos analizados

La oscilación libre del núcleo, FCN, es un fenómeno que se da debido a que los ejes de rotación del núcleo líquido y del manto no se encuentran alineados (Brzeziński y Petrov, 1999). La naturaleza del FCN proviene principalmente por la elipticidad del límite manto-núcleo y su deformación, además de la existencia de una rotación diferencial entre ambos. El FCN produce movimientos sobre la nutación que no son considerados en el modelo IAU2006/2000A, por lo que se puede notar un movimiento diurno en los offsets del polo celeste, denominado Bamboleo Libre Aproximadamente Diurno (NDFW).

El análisis de este efecto excede lo propuesto para este trabajo, sin embargo, en la figura 4.8 modelamos el NDFW con datos de  $dX$  y  $dY$  provenientes de la serie C04 utilizando la función publicada por Lambert (2007) que parte de observaciones VLBI, y la superponemos con nuestros datos. En ella podemos notar el acuerdo existente entre nuestros resultados y el modelo propuesto. Una mejor estimación y comparación podría realizarse analizando una serie más larga de observaciones cuyas soluciones sean producto de un ajuste global.



**Figura 4.8:** Modelo de Lambert y estimaciones del IGN para  $dX$  y  $dY$ .

## 4.9. Conclusión de la comparación

Hemos visto en la sección anterior que las diferencias de la solución del IGN con respecto a la solución IERS EOP 14 C04 (IAU2006/2000A) no se apartan tanto de aquella que tienen el GFZ y el NMA con esta última. De hecho, si consideramos el valor medio de las diferencias de las estimaciones del GFZ y el NMA con el IGN es menor que el error en la estimación de los EOP de los Bulletin B, por lo cual puede ser despreciable. Sin embargo hay una excepción en las coordenadas del polo, donde el apartamiento no es menor que el error, pero en este caso la media de las diferencias del IGN con el IERS es menor que aquella que tienen el GFZ y el NMA. Por otro lado, observando los valores de la BKG en la comparación, es notable un bias en su estimación de los parámetros, como explicamos en este capítulo, y que más allá de esto, debemos considerar que son soluciones globales.

Las dispersiones de las diferencias que cada centro tiene con el IERS se encuentran en el mismo orden de magnitud, siendo para el IGN siempre el menor excepto en  $yp$ . Hay que hacer una excepción con la dispersión que posee la solución global de los EOP de la BKG en esta misma diferencia, ya que decae bastante con respecto a los otros centros, lo que puede ser explicado por ser soluciones globales.

También, pudimos ver que la desviación estándar en la estimación de cada parámetro hecha por el IGN, es acorde con aquella entregada en la estimación diaria del GFZ y del NMA.

Bajo las consideraciones hechas anteriormente, podemos concluir que la calidad de las soluciones entregadas por el IGN, es acorde a la de otros centros de análisis IVS.

Un comentario final a tener en cuenta es que esta comparación fue hecha con 43 sesiones particulares y en un futuro deberá hacerse con todas las sesiones procesadas por el IGN con el objetivo de aumentar la cantidad de muestras y tener un resultado más preciso.

## Capítulo 5

# TIGO y AGGO en la determinación de EOP

### 5.1. Motivación del análisis

Como hemos visto en la sección 4.1, la distribución de antenas no es homogénea alrededor del mundo, e incluso en el hemisferio sur, y más aún en Sudamérica, la cantidad de ellas es escasa. Ya hemos mencionado que una mejor distribución de estas ayudaría a mejorar la realización de ICRF e ITRF.

En este capítulo estudiaremos la importancia de contar con estaciones en el hemisferio sur, como AGGO o TIGO, en la determinación de los EOP. Para ello hemos tomado tres períodos diferentes: uno que incluye a TIGO, otro sin ninguna de las dos estaciones, y el último con AGGO ya operativo. Esto nos permitirá también analizar la configuración de la red R1/R4 conforme cambia el tiempo junto con la ganancia o pérdida de líneas de base según la tecnología VLBI evoluciona.

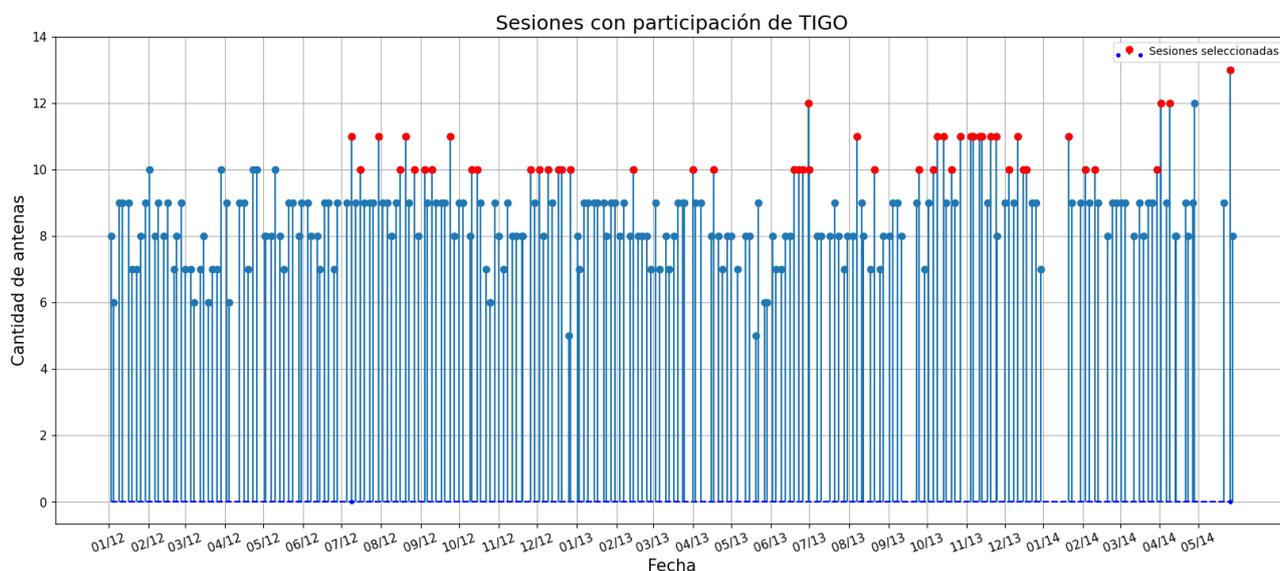
### 5.2. Selección de sesiones

Se tomó como información de partida, las estimaciones que realizamos en el IGN para los tres períodos mencionados en la motivación. Se ha tenido en cuenta para este estudio el análisis de sesiones R1 y R4 con 10 o más estaciones involucradas, para intentar garantizar una buena distribución de las mismas y así obtener los mejores resultados en cada caso, reduciendo el error debido a la cantidad de antenas utilizadas. Los tres períodos y sus sesiones correspondientes se seleccionaron de la siguiente manera:

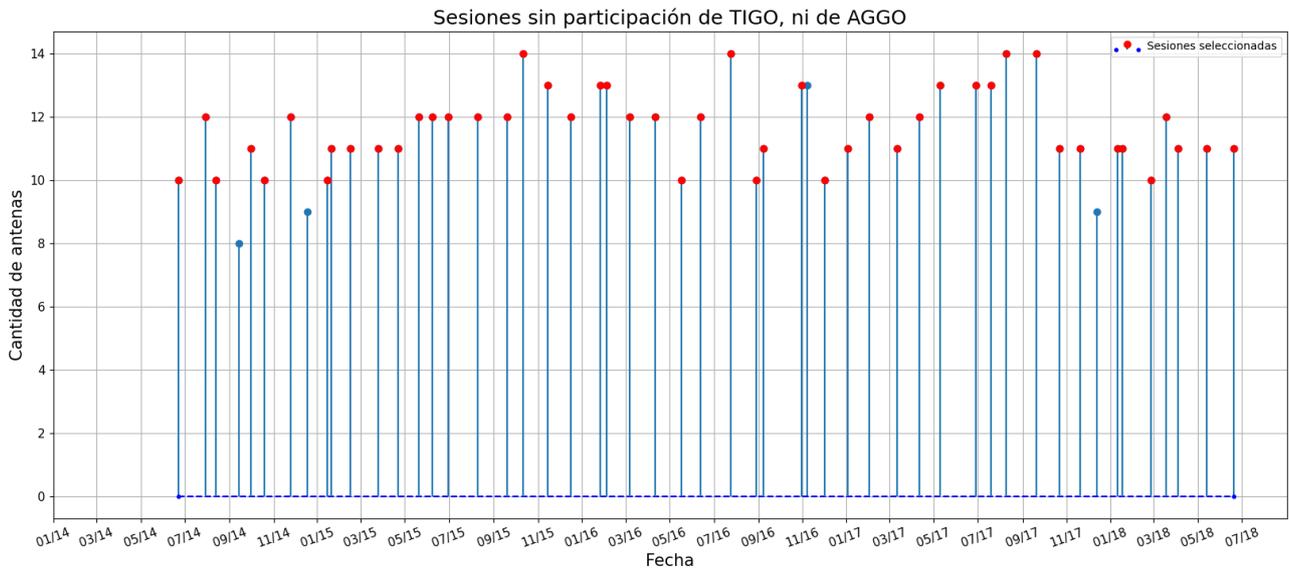
- El primer período abarca los últimos dos años en los que la estación TIGO tuvo participación en IVS, es decir desde julio del 2012 a mayo del 2014, al cual llamaremos período “Con TIGO”. Para este se tomaron todas las sesiones R1/R4 donde TIGO ha estado involucrado.
- El segundo período abarca los cuatro años en los que ni TIGO, ni AGGO, tuvieron participación, al cual llamaremos período “Intermedio” y comprende un lapso de tiempo desde junio del 2014 a mayo del 2018. De este se seleccionaron las sesiones R1/R4 con más estaciones participantes para cada mes, siempre y cuando esta cantidad sea mayor o igual que 10. Caso que no existiera dicha sesión para determinado mes, se tomó una sesión adicional para el mes anterior o posterior.
- El tercer período abarca los primeros dos años en los que AGGO tuvo participación en IVS, al cual llamaremos período “Con AGGO”. En este caso no se tuvo en cuenta el año 2018 por

la irregularidad de la intervención de AGGO en las sesiones y también, porque para ese año, participó en tan solo una sesión con 10 o más antenas midiendo. Resulta, entonces, que el período seleccionado comprende los años 2019 y 2020.

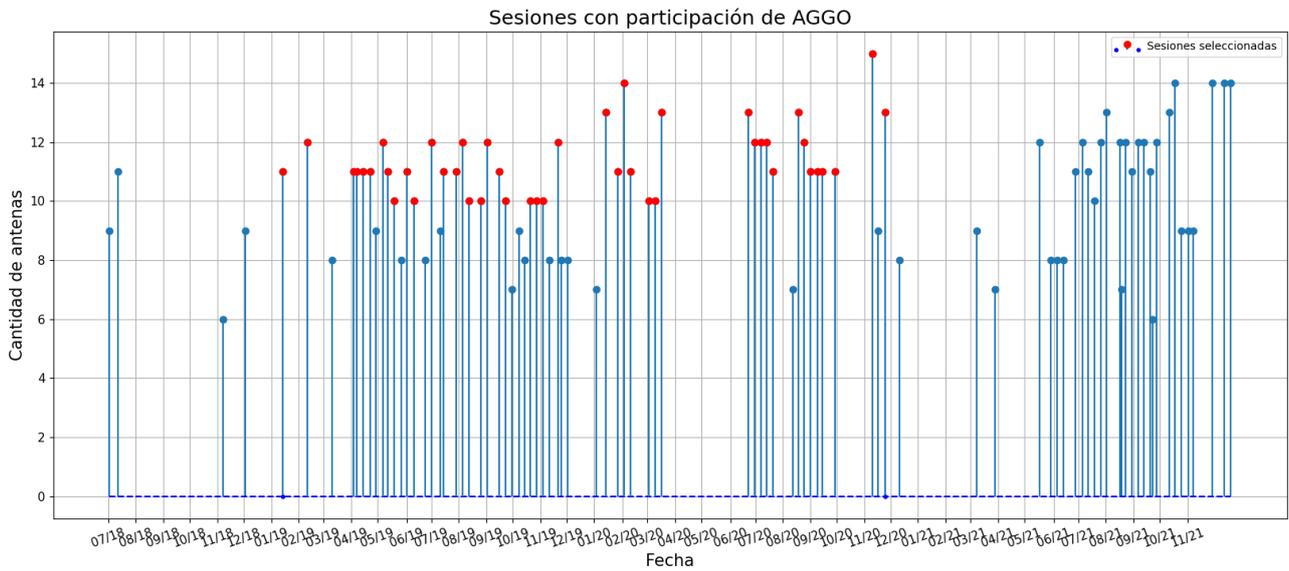
En las figuras 5.1 y 5.3 se muestran las sesiones R1/R4 en las que las dos antenas consideradas aparecieron en los Master Schedule de IVS para los años elegidos. Pintadas de rojo están aquellas sesiones seleccionadas para cada período. Notar que para el período “Con TIGO” no fue seleccionada la sesión correspondiente al SINEX 14APR29XE, que a pesar de aparecer en el Schedule, no aparece en los datos de entrada del análisis, seguramente porque el correlador la eliminó o porque durante la construcción de la base de datos fue descartada. Por otra parte, en la figura 5.2 se muestran las sesiones con mayor cantidad de antenas participantes por mes para el período “Intermedio”, y en rojo están aquellas seleccionadas. Notar que en este período no fue seleccionada la sesión correspondiente al SINEX 16NOV07XA, ya que presentó numerosas dificultades durante la observación y cuya precisión en la estimación de los EOP ha sido paupérrima, en su lugar fue seleccionada otra sesión en ese mes con una cantidad alta de antenas participantes. Finalmente, fueron un total de 143 sesiones elegidas (50 para el período “Con TIGO”, 49 para “Intermedio” y 44 para “Con AGGO”), cuales se nombran en la tabla del apéndice A.



**Figura 5.1:** Sesiones R1/R4 que incluyen a TIGO. En rojo están aquellas seleccionadas.



**Figura 5.2:** Sesiones R1/R4 con mayor participación de antenas por mes en el período donde AGGO ni TIGO han participado. En rojo están aquellas seleccionadas.



**Figura 5.3:** Sesiones R1/R4 que incluyen a AGGO. En rojo están aquellas seleccionadas.

El análisis sobre todas las sesiones arrojó los resultados presentados en la tabla 5.1, donde la columna O-C hace referencia al apartamiento estimado con VieVS a la serie IERS C04 14. En dicha tabla se presentan los promedios de estos apartamientos y el desvío que ellos poseen. Esto se muestra con el objetivo de tener una referencia de la magnitud de la estimación.

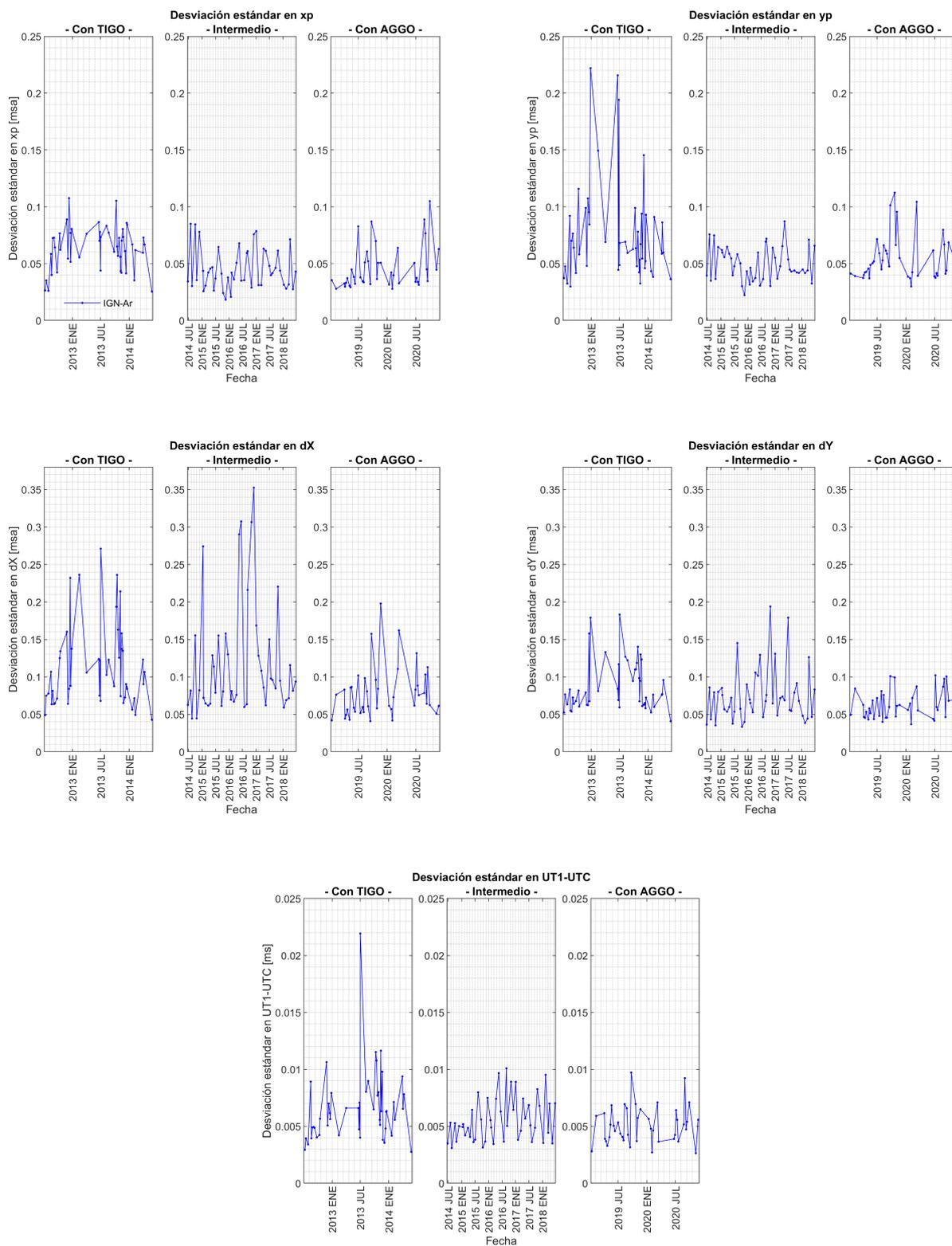
O-C	xp[msa]	yp[msa]	UT1-UTC[ms]	dX[msa]	dY[msa]
Promedio	0,040	0,025	-0,0009	-0,010	0,004
Desvío	0,119	0,143	0,0132	0,122	0,105

**Tabla 5.1:** Promedio y desviación estándar del apartamiento de los EOP estimado con VieVS a la serie IERS C04 14.

### 5.3. Errores en la estimación

Para la estimación de los EOP en cada sesión seleccionada fue utilizado el software VieVS adoptando los modelos descritos en la sección 4.5. De esta manera, se obtuvo un conjunto de parámetros provenientes de la solución diaria de cada una de las sesiones.

En las figuras 5.4 se muestran las desviaciones estándar obtenidas en la estimación de cada EOP en función de las épocas de las sesiones. Estos gráficos se realizan en los tres períodos mencionados por separado. Se detectaron seis outliers (2 en cada período de 44, 49 y 50 sesiones) bajo el criterio que elimina aquellos valores que se apartan de la media una distancia de  $\pm 3\sigma$ , donde  $\sigma$  es la desviación estándar. Para darnos una idea de cuales son sus valores, los outliers rondan alrededor de los 0,15 msa para  $x_p$  e  $y_p$ , 0,043 ms para UT1-UTC y 0,45 msa para  $dX$  y  $dY$ .



**Figura 5.4:** Desviación estándar de las estimaciones de EOP hechas por el IGN para cada sesión, separado por período en cada EOP. Las líneas que unen los puntos son ficticias.

A continuación se hará una descripción de los resultados obtenidos parámetro por parámetro de acuerdo a lo mostrado en la figura 5.4, cuyos valores máximos y mínimos de desvíos junto a la amplitud que ellos poseen y al porcentaje de valores que caen por debajo del error medio esperado en la estimación de los parámetros (considerados estos como 0,06 msa para  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $dX$  y  $dY$ , y 0,006 ms

para UT1-UTC, en función de los errores presentados por la serie IERS EOP 14 C04 y lo presentado por Sovers *et al* (1998)) se presentan en la tabla 5.2:

EOP	Atributo	Con TIGO	Intermedio	Con AGGO
xp	Mínimo [msa]	0,025	0,018	0,028
	Máximo [msa]	0,108	0,085	0,105
	Amplitud [msa]	0,082	0,067	0,077
	<0,06 msa [%]	37,5	74,5	78,6
yp	Mínimo [msa]	0,030	0,022	0,030
	Máximo [msa]	0,222	0,087	0,112
	Amplitud [msa]	0,192	0,065	0,082
	<0,06 msa [%]	45,8	74,5	69,0
UT1-UTC	Mínimo [ms]	0,003	0,003	0,003
	Máximo [ms]	0,022	0,010	0,010
	Amplitud [ms]	0,019	0,007	0,007
	<0,006 ms [%]	47,9	63,8	73,8
dX	Mínimo [msa]	0,043	0,044	0,041
	Máximo [msa]	0,271	0,352	0,200
	Amplitud [msa]	0,228	0,308	0,159
	<0,06 msa [%]	8,3	8,5	35,7
dY	Mínimo [msa]	0,041	0,033	0,036
	Máximo [msa]	0,183	0,194	0,102
	Amplitud [msa]	0,142	0,161	0,065
	<0,06 msa [%]	16,7	42,6	54,8

**Tabla 5.2:** Valores máximos y mínimos de los desvíos de las estimaciones ,y su diferencia (Amplitud) para la estimación de cada EOP por período, junto al porcentaje de valores que caen por debajo del error medio esperado en la estimación de los parámetros.

- En xp:
  - El máximo de los desvíos es mayor en la época “Con TIGO”.
  - Los menores valores, tanto para el máximo como para el mínimo de los desvíos, se dan para el período “Intermedio”.
  - La fracción de desvíos que caen por debajo de los 0.06 msa es mayor para “Con AGGO”, seguido, y no mucho más que el “Intermedio”.
  - Por lo tanto, el período menos preciso es “Con TIGO”, y el más preciso es el “Intermedio”, aunque este último no se aparte mucho de “Con AGGO”.
- En yp:
  - El máximo de los desvíos es notablemente mayor en la época “Con TIGO”.
  - Los menores valores, tanto para el máximo como para el mínimo de los desvíos, se dan para el período “Intermedio”.
  - La fracción de desvíos que caen por debajo de los 0.06 msa es mayor para el “Intermedio”, seguido por el período “Con AGGO”.
  - Por lo tanto, el período menos preciso es “Con TIGO”, y el más preciso es el “Intermedio”. Aunque los valores del período “Con AGGO” no se apartan tanto de este último.
- En UT1-UTC:

- El máximo de los desvíos es mayor en la época “Con TIGO”.
  - Los valores máximos y mínimos de los desvíos para “Intermedio” y “Con AGGO” son iguales.
  - La fracción de desvíos que caen por debajo de los 0,06 msa es mayor para “Con AGGO”, seguido por el período “Intermedio”.
  - Por lo tanto, el período menos preciso es “Con TIGO”, y el más preciso es “Con AGGO”, aunque no exista una gran diferencia con el período “Intermedio”.
- En dX:
    - el máximo y mínimo de los desvíos es mayor en la época “Intermedio”.
    - el máximo y mínimo de los desvíos es menor en la época “Con AGGO”.
    - La fracción de desvíos que caen por debajo de los 0,06 msa es mayor para “Con AGGO”, los otros dos tienen aproximadamente el mismo porcentaje.
    - Por lo tanto, el período menos preciso es “Intermedio”, y el más preciso es “Con AGGO”.
  - En dY:
    - El máximo de los desvíos es mayor en la época “Intermedio”, y es menor para “Con AGGO”.
    - El mínimo de los desvíos es menor para la época “Intermedio” y mayor para “Con TIGO”.
    - La fracción de desvíos que caen por debajo de los 0.06 msa es considerablemente mayor para “Con AGGO” y es menor, “Con TIGO”.
    - Por lo tanto, el período menos preciso es “Con TIGO”, y el más preciso es “Con AGGO”.

En resumen, la precisión para “Con TIGO” comparado con los demás es menor en todos los parámetros menos en dX donde es superado por el período “Intermedio”. Por otra parte, los mejores valores para dX y dY se dan cuando está AGGO, pero para el caso de las coordenadas del polo,  $x_p$  e  $y_p$ , los mejores valores se dan en el período “Intermedio” (aunque no por mucho más que en el período “Con AGGO”). Para UT1-UTC, la precisión es levemente mejor para el período “Con AGGO” sin apartarse mucho al “Intermedio”. De esta manera, la presencia de AGGO parece no influir significativamente en  $x_p$ ,  $y_p$  y UT1-UTC, pero sí hacerlo en dX y dY. Sin embargo debemos considerar que en el último período, en el cual se encuentra AGGO, el lapso de tiempo analizado fue menor que el período intermedio, además tengamos en cuenta que estos fueron los primeros años de AGGO donde su performance pudo mejorar en años posteriores.

#### **5.4. Análisis sobre la influencia diferentes aspectos de la red de observación sobre la desviación estándar**

La cantidad de antenas VLBI activas ha variado con el tiempo y con ello, también lo ha hecho la cantidad de observaciones por sesión. A su vez, la distribución de estaciones se ha visto modificada período tras período debido a la situación de la red en la época de observación. De hecho, las antenas participantes en las líneas de base donde se involucra a AGGO han sido distintas a aquellas donde se TIGO. En las figuras 5.5, 5.7 y 5.6 quedan expuestas las estaciones participantes en los períodos seleccionados.

A continuación, para complementar el análisis, se presentarán cuatro estudios sobre la desviación estándar en función de distintos parámetros que caracterizan la geometría de la red y su funcionamiento, ya sea estudiando la cantidad de líneas de base este-oeste o norte-sur, la distribución de las estaciones o la cantidad de observaciones por sesión.

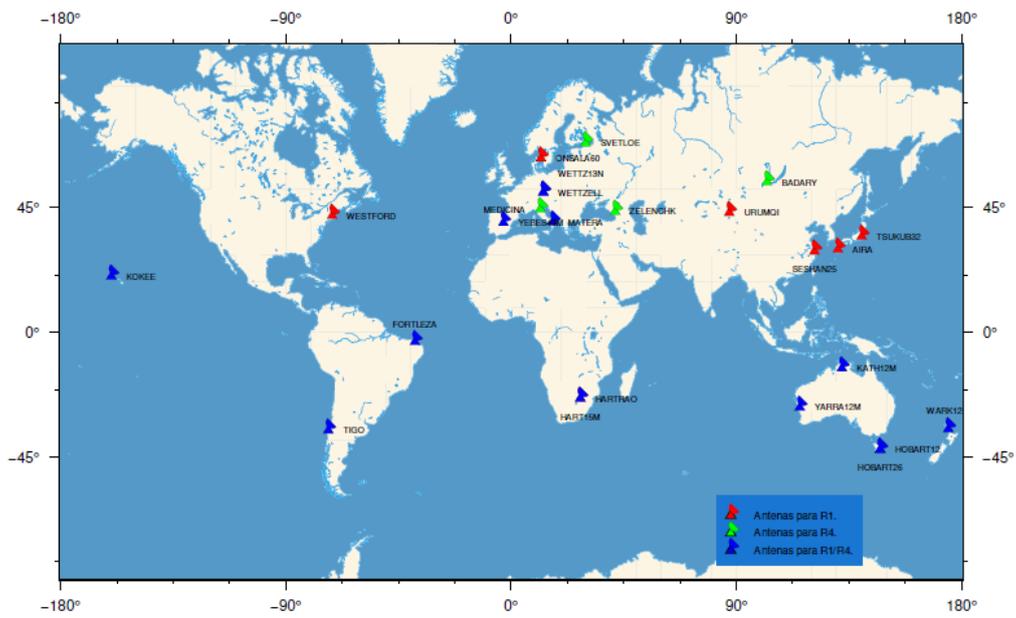


Figura 5.5: Antenas participantes en el período “Con TIGO” en sesiones R1 y R4.

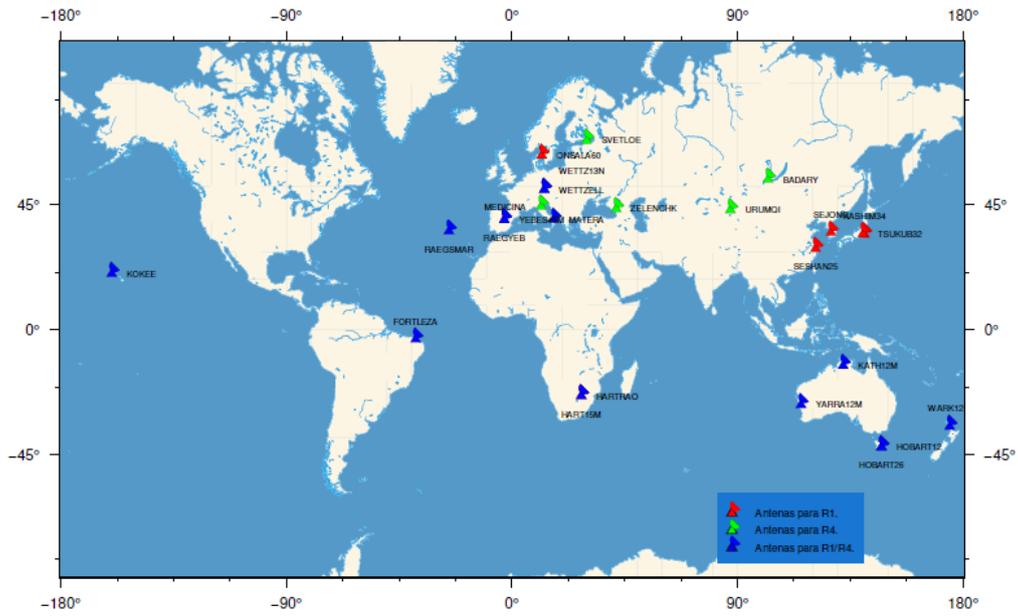


Figura 5.6: Antenas participantes en el período “Intermedio” en sesiones R1 y R4.

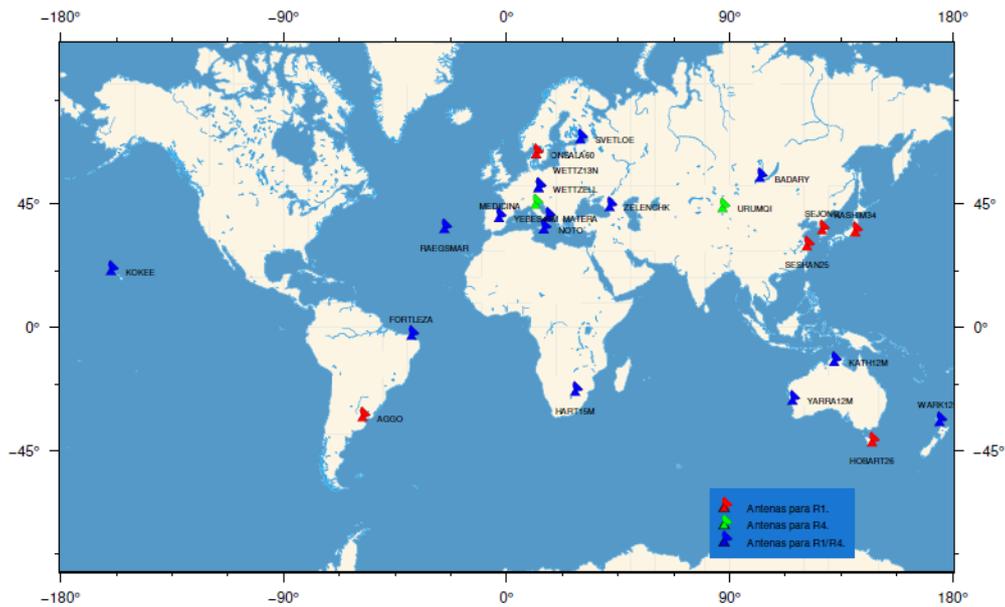


Figura 5.7: Antenas participantes en el período “Con AGGO” en sesiones R1 y R4.

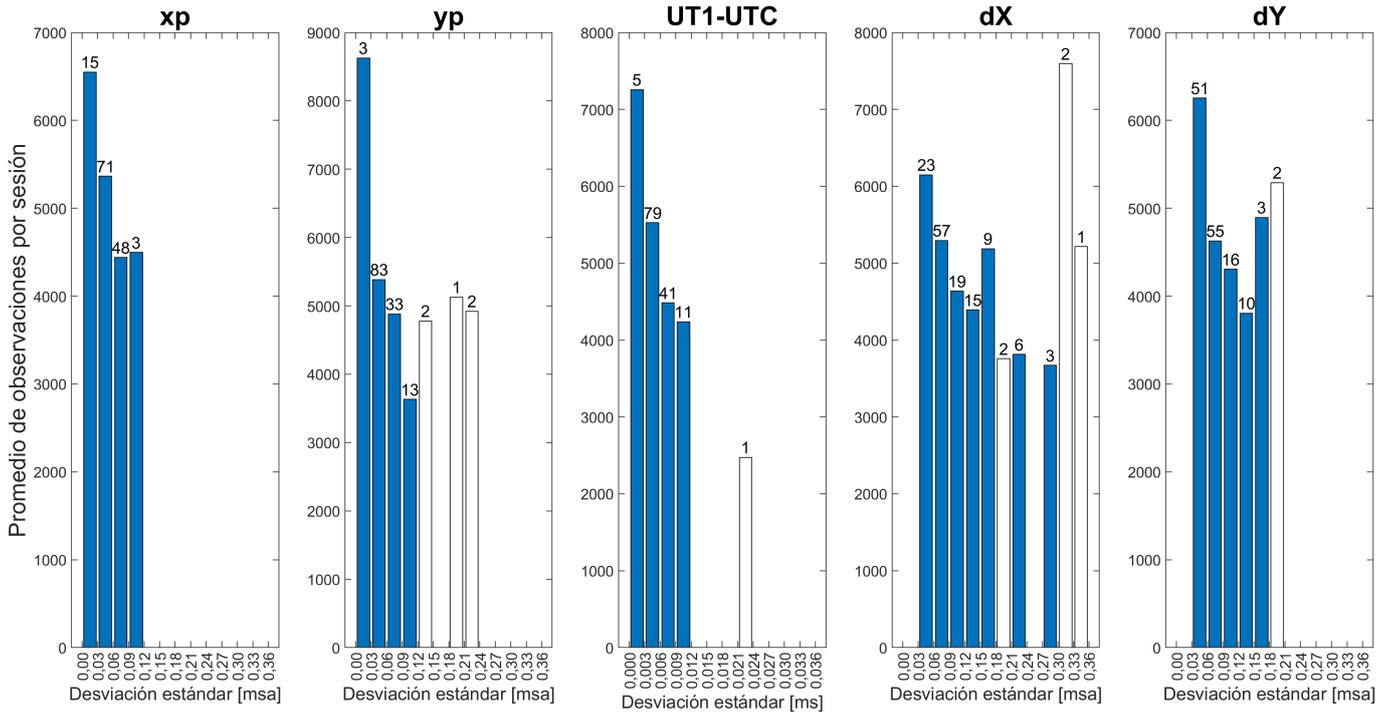
#### 5.4.1. Desviación estándar en función de la cantidad de observaciones

En esta sección se buscará alguna relación entre la desviación estándar en la estimación de los EOP con la cantidad de observaciones por cada sesión, con el objetivo de estudiar la influencia de este factor en la precisión de dicha estimación y como evoluciona entre los tres períodos seleccionados. Para ello se tomaron las estimaciones hechas en las mismas 143 sesiones seleccionadas con anterioridad.

Como primer paso del estudio, en la figura 5.8 se realizó un gráfico de barras, donde se presentó por intervalo de desviación en la estimación de cada parámetro, el promedio de observaciones de todas las sesiones cuyo análisis arrojó dicha precisión. Sobre cada barra se indica la cantidad de sesiones de la muestra total que han caído dentro de ese intervalo y, por lo tanto, han sido utilizadas para calcular el promedio de las observaciones. Las barras pintadas en blanco indican que su media podría no llegar a ser representativa de su respectivo intervalo por la poca cantidad de sesiones (menor o igual a 2) involucradas en el cálculo.

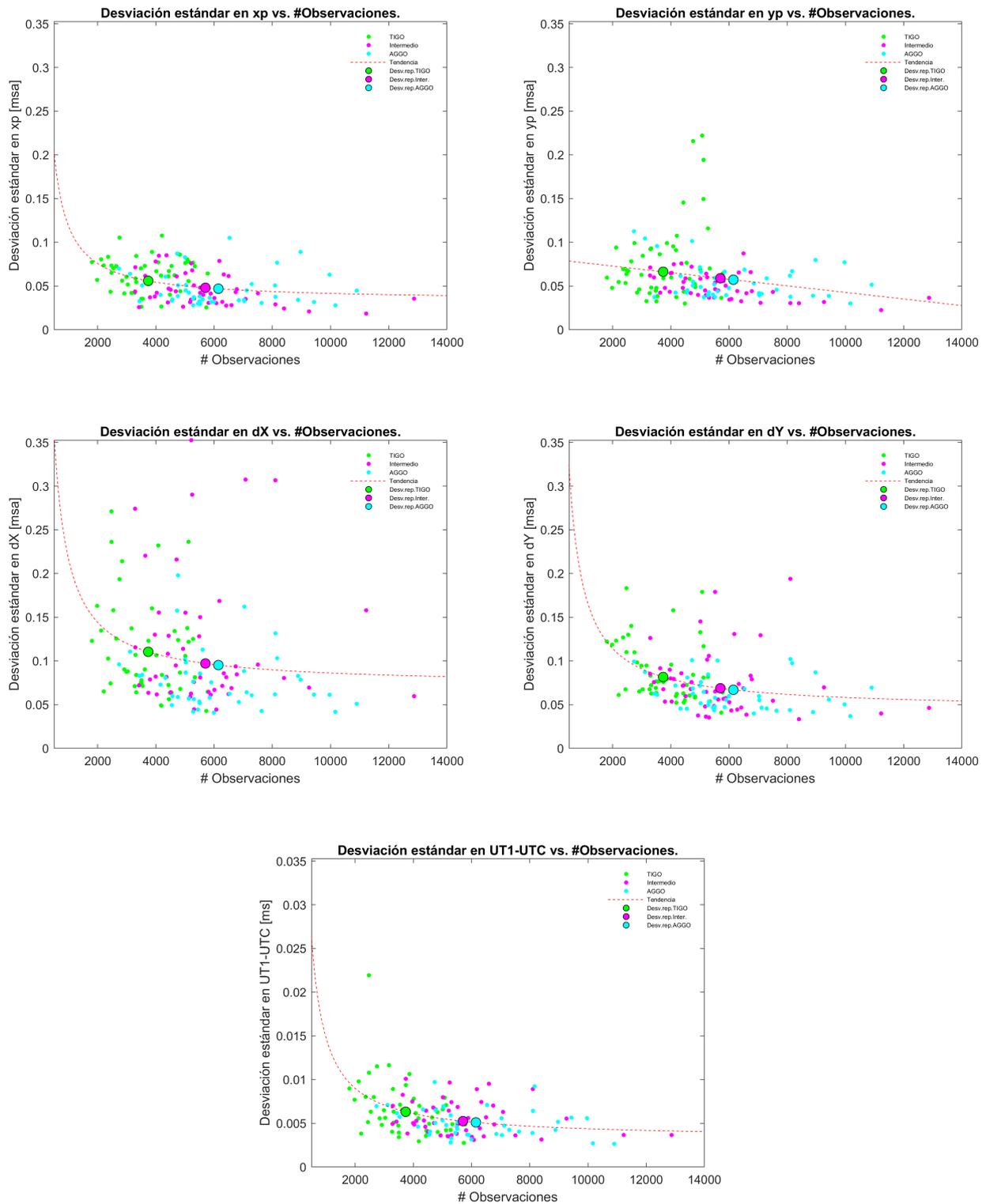
Del análisis de esta última figura se desprende que para los parámetros de rotación,  $x_p$ ,  $y_p$  y UT1-UTC, se aprecia una disminución de las observaciones con el aumento del desvío. Para  $dX$ , dicha tendencia no es clara y para  $dY$  tampoco, aunque si consideramos que sus últimas barras no son representativas, la tendencia decreciente puede verse de mejor forma.

Promedio de #observaciones por intervalo de desviación estándar



**Figura 5.8:** Promedio de cantidad de observaciones de todas las sesiones cuya estimación presenta una desviación estándar en el rango presentado. Sobre cada barra se presenta la cantidad de sesiones que cayeron dentro de cada intervalo de desvío. En blanco, aquellas barras cuyo promedio fue calculado con 2 o menos sesiones.

Continuando con el estudio, en los gráficos 5.9, se muestran las desviaciones estándar para cada EOP en función de la cantidad de observaciones en la sesión correspondiente.



**Figura 5.9:** Gráficos de desviación estándar vs. número de observaciones. Los desvíos han sido graficados con puntos de distintos colores según al período que correspondan. Además, se adiciona una función ajustada en rojo y los desvíos representativos a cada período con puntos gruesos.

A cada set de datos se le ha ajustado, mediante mínimos cuadrados, dos funciones diferentes considerando el comportamiento decreciente analizado a partir de la figura 5.8. Dichas funciones han sido una hipérbola de la forma  $Desviación\ estándar = b_h + a_h/nro.observaciones$  y una recta de la forma  $Desviación\ estándar = b_l + a_l.nro.observaciones$ . En la tabla 5.3, se muestran los valores de

estos coeficientes y el Error Cuadrático Medio (ECM) para cada ajuste.

Coeficientes y EMC	xp	yp	UT1-UTC	dX	dY
$a_h[msa \cdot 10^3 obs][ms \cdot 10^3 obs]$	0,086	0,064	0,0116	0,145	0,140
$b_h[msa][ms]$	0,033	0,047	0,0032	0,072	0,044
$Ecm_h[msa][ms]$	0,004	0,012	0,0001	0,041	0,010
$a_l[msa/10^3 obs][ms/10^3 obs]$	-0,004	-0,004	-0,0004	-0,005	-0,005
$b_l[msa][ms]$	0,071	0,080	0,0080	0,132	0,1010
$Ecm_l[msa][ms]$	0,004	0,011	0,0001	0,042	0,011

**Tabla 5.3:** Coeficientes de las funciones y errores cuadráticos medios en cada ajuste sobre los datos de desvío en función de la cantidad de observaciones.

Luego, se seleccionó la función con el menor ECM para cada EOP, la cual se aprecia en la figura 5.9 como una línea roja a trazos. En los casos tales que los ECM sean iguales, se ha priorizado la hipérbola, ya que se piensa que los desvíos de la estimación se debería comportar de manera similar a los errores del observable que da lugar a la estimación de los EOP, es decir el retardo multibanda.

Por otra parte, se calculó en promedio la cantidad de observaciones por sesión para cada período considerado. A continuación, se determinó la desviación estándar asociada a cada promedio mediante su evaluación en las funciones ajustadas, y los tomamos como representativos de su respectivos períodos. Estos últimos resultados se muestran en la tabla 5.4, donde también se muestran las diferencias que hubo entre períodos y su variación porcentual ( $\frac{x_f - x_i}{x_i} \cdot 100\%$  donde  $x$  hace referencia al parámetro estudiado, y los subíndices  $i$  y  $f$ , a que el valor que toma dicho parámetro es el del período más antiguo y más actual, respectivamente).

Período	Nro. de Observaciones	xp[msa]	yp[msa]
Con TIGO	3736,917	0,056	0,066
Intermedio	5703,894	0,048	0,059
Con AGGO	6149,571	0,047	0,057
Dif.Int.-TIGO	1966,977(52,6 %)	-0,008(-14,2 %)	-0,007(-11,6 %)
Dif.AGGO-Int.	445,678(7,8 %)	-0,001(-2,3 %)	-0,002(-2,9 %)
Dif.AGGO-TIGO	2412,655(64,6 %)	-0,009(-16,1 %)	-0,009(-14,3 %)

Período	UT1-UTC[ms]	dX[msa]	dY[msa]
Con TIGO	0,0063	0,110	0,082
Intermedio	0,0052	0,097	0,069
Con AGGO	0,0051	0,095	0,067
Dif.Int.-TIGO	-0,0011(-16,9 %)	-0,013(-12,1 %)	-0,013(-15,8 %)
Dif.AGGO-Int.	-0,0001(-2,8 %)	-0,002(-1,9 %)	-0,002(-2,6 %)
Dif.AGGO-TIGO	-0,0012(-19,2 %)	-0,015(-13,8 %)	-0,015(-18,0 %)

**Tabla 5.4:** En las tres primeras filas, desviación estándar representativa de cada período en función de las observaciones. En las últimas tres filas, la variación que sufre el desvío representativo período tras período incluyendo entre paréntesis la variación porcentual.

Notar que al pasar del período “Con TIGO” al “Intermedio” las observaciones promedio por sesión se han incrementado en un 52,6 % y al pasar del período “Intermedio” a “Con AGGO” el incremento ha sido mucho menor, 7,8 %. Como consecuencia de esto último y según el ajuste de las curvas a los datos, dicha tendencia influye en la desviación estándar de cada parámetro período tras período haciendo que esta baje. Si miramos las variaciones, vemos que a través del tiempo, la desviación estándar para todos los EOP baja siendo menos significativa la diferencia entre los últimos períodos, debido a que no hubo un gran aumento de la cantidad promedio de observaciones por sesión al pasar de

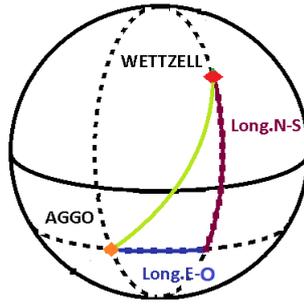
un período a otro. Y si miramos sus variaciones porcentuales, el parámetro más afectado es UT1-UTC.

Lo que podemos notar a través de las figuras 5.2 y 5.3 en comparación con la figura 5.1 es que la cantidad de estaciones promedio por sesión ha aumentado desde el primer período al último, siendo esto concordante con el aumento del 64,6% del número de observaciones. Todo esto indica que el aumento de estaciones, incluyendo a AGGO, debieran ocasionar que la precisión en los valores estimados mejoren, aunque sea, de manera leve.

#### 5.4.2. Desviación estándar en función de líneas de base con orientación Este-Oeste

En esta sección se buscará alguna relación entre la desviación estándar en la estimación de los EOP con la cantidad de líneas de base con orientación predominantemente Este-Oeste (E-O) por sesión, con el objetivo de estudiar su influencia en la precisión de dicha estimación y su evolución entre los tres períodos seleccionados. Para ello, se estudiaron las estimaciones hechas en las mismas 143 sesiones seleccionadas con anterioridad.

Debido a que no existen líneas de base puramente E-O, se calculó para cada sesión la predominancia que poseen sus líneas hacia dicha orientación. Esto se calculó de la siguiente manera, primero para cada una de las sesiones se tomaron las líneas de base que superasen los 3500 km y en las que  $1.5\Delta\varphi < \Delta\lambda$  (siendo  $\Delta\varphi$  y  $\Delta\lambda$  la diferencia de latitud y longitud entre las antenas, respectivamente). Luego, para cada línea que cumplía la condición anterior se le calculó la longitud de su proyección E-O sobre el paralelo de la estación más cercana al Ecuador, como muestra la figura 5.10. Es decir, que la longitud considerada para cada línea de base es la longitud del arco entre los meridianos de ambas antenas medido sobre paralelo más cercano al Ecuador.



**Figura 5.10:** Descomposición de línea de base en orientación N-S y E-O.

La descomposición de una línea de base entre la antena  $i$  y  $j$  se puede expresar matemáticamente mediante la ecuación 5.4.1.

$$LongitudEO_{ij} = \cos[\min(|\varphi_i|, |\varphi_j|)] \cdot |\lambda_i - \lambda_j| \cdot 6371000m \quad (5.4.1)$$

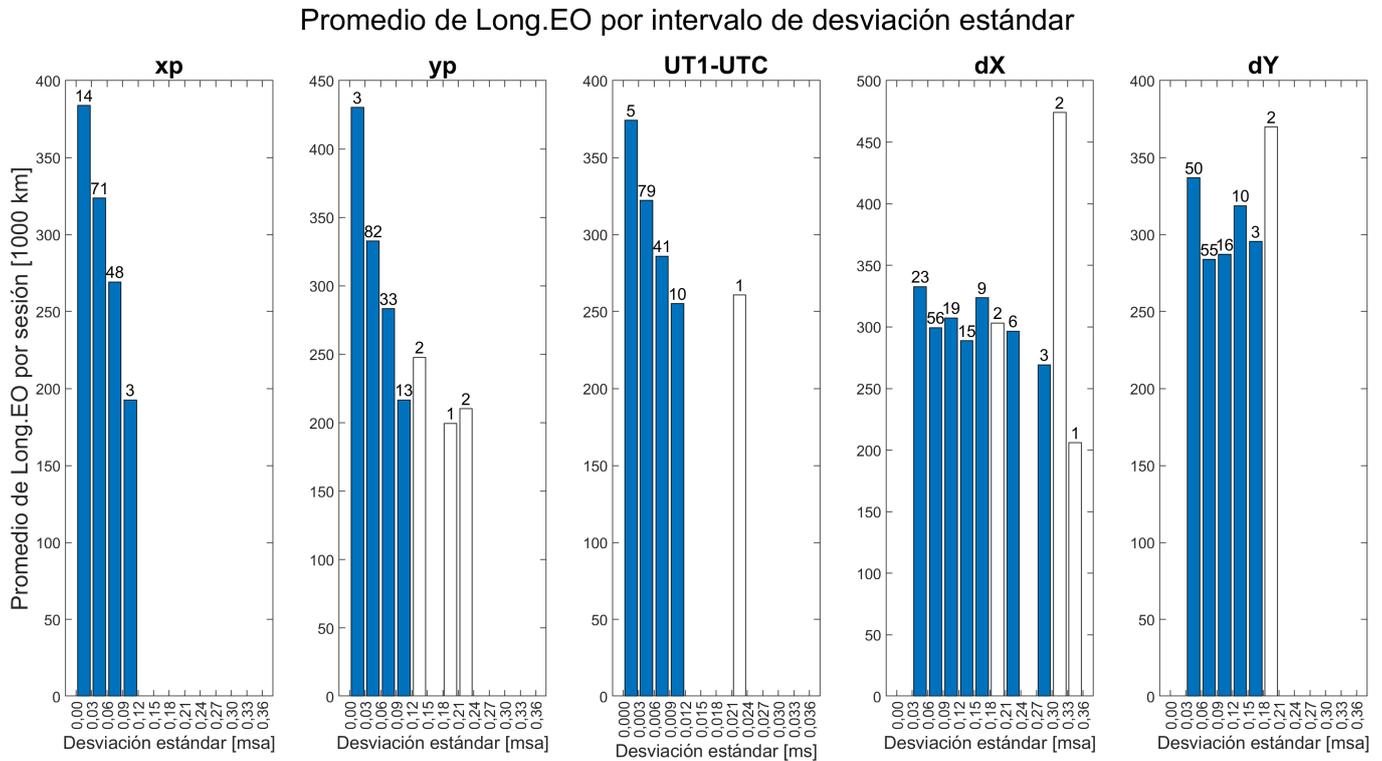
donde  $(\varphi_i, \lambda_i)$  es la latitud y longitud de la antena  $i$  en radianes, y donde se tomó un radio medio terrestre de 6371 km.

Finalmente, para cada sesión se calculó que tanto predominan las líneas de base E-O en la sesión a través del parámetro  $LongitudEOs_r$  que corresponde a la suma de todas las  $LongitudEO_{ij}$  para cada par de antenas. Resultando para la sesión  $r$  que

$$LongitudEOs_r = \sum_{i,j=1}^{N,N} LongitudEO_{ij} \quad (5.4.2)$$

donde  $N$  es la cantidad de antenas participantes en la sesión  $r$ . Para este cálculo, no se tuvieron en cuenta las líneas de base excluidas previamente por los centros de análisis de IVS.

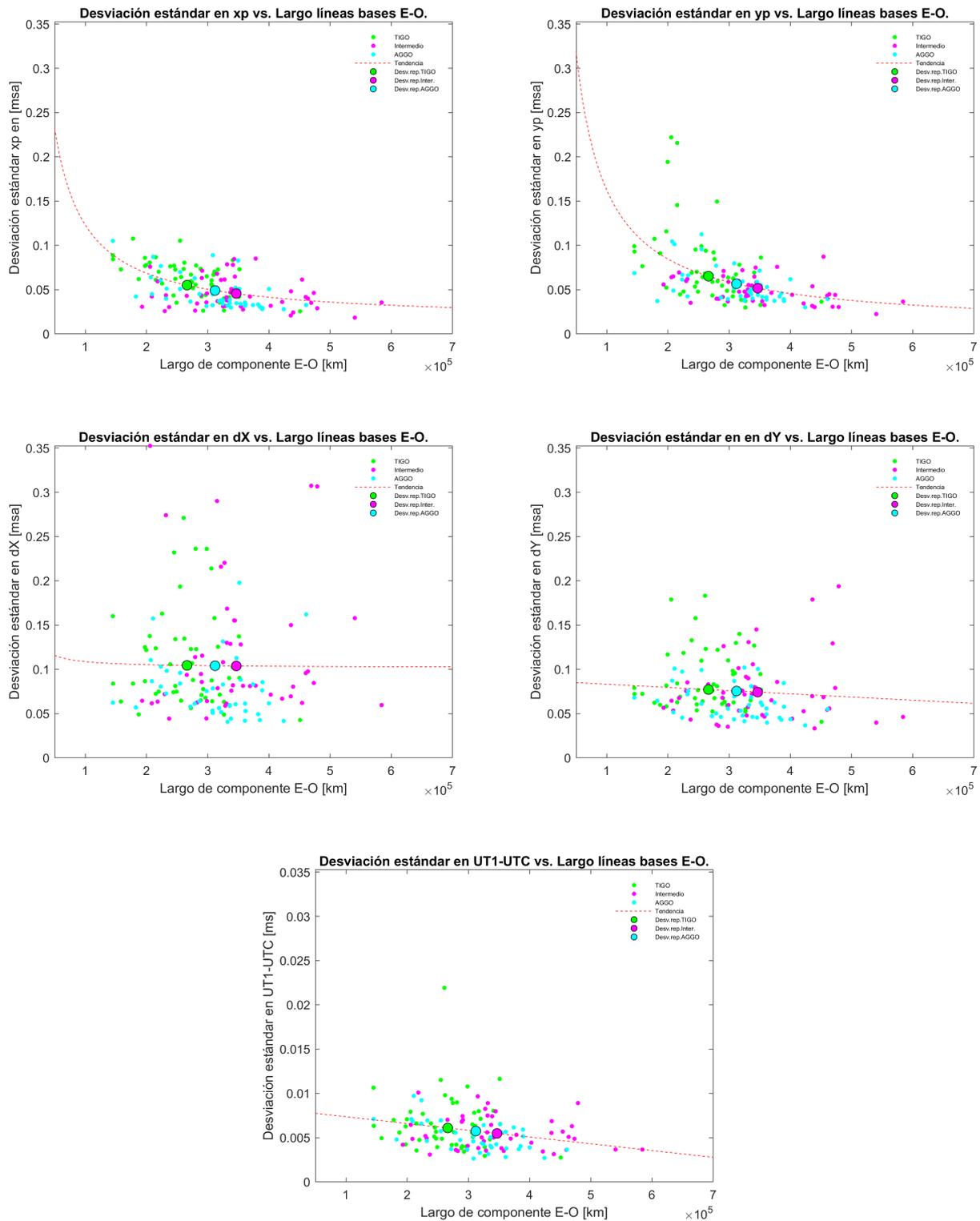
En la figura 5.11 se realizó un gráfico de barras, donde se presentó por intervalo de desviación en la estimación de cada parámetro, el promedio de la  $LongitudEOs_r$  de todas las sesiones cuyo análisis arrojó dicha precisión. Al igual que en el caso del estudio de la influencia de la cantidad de observaciones sobre el desvío, aquí también sobre cada barra se indica que cantidad de sesiones de la muestra total han caído dentro de ese intervalo, y por lo tanto han sido utilizadas para calcular el promedio. Las barras pintadas en blanco indican que su media podría no llegar a ser representativa de su respectivo intervalo, por la poca cantidad de sesiones (menor o igual a 2) involucradas en el cálculo.



**Figura 5.11:** Promedio de  $LongitudEOs_r$  de todas las sesiones cuya estimación presenta una desviación estándar en el rango presentado. Sobre cada barra se presenta la cantidad de sesiones que cayeron dentro de cada intervalo de desvío. En blanco, aquellas barras cuyo promedio fue calculado con 2 o menos sesiones.

Del análisis de esta última figura se desprende que para los parámetros de rotación, se aprecia un aumento de los desvíos conforme disminuyen las líneas de base E-O. Para dX, no se nota dicha tendencia y para dY, tampoco, quizás es más claro si no tomamos como representativas de sus respectivos intervalos a las barras de blanco.

Siguiendo con el análisis, en los gráficos 5.12, se muestran las desviaciones estándar para cada EOP en función de  $LongitudEOs_r$  período por período.



**Figura 5.12:** Gráficos de desviación estándar vs.  $LongitudEOs_r$ . Los desvíos han sido graficados con puntos de distintos colores según al período que correspondan. Además, se adicionas una función ajustada en rojo y los desvíos representativos a cada período con puntos gruesos.

A cada set de datos se les ha ajustado, mediante mínimos cuadrados, dos funciones que admitan un comportamiento decreciente por lo visto en el análisis de la figura 5.11. Se ha tomado para este ajuste una función con comportamiento hiperbólico de la forma  $Desviación\ estándar = b_h + a_h/LongitudEOs_r$  y otra con comportamiento lineal de la forma  $Desviación\ estándar = b_l +$

$a_i$ .  $LongitudEOs_r$ . En la tabla 5.5, se muestran los valores de estos coeficientes y el ECM para cada ajuste. Notar que el ECM para dX y, en menor medida, para dY es mayor que para los parámetros de rotación como podíamos anticiparlo de la conclusión de que estos no presentan una tendencia tan clara a disminuir de su desvío con el aumento de la  $LongitudEOs_r$ .

Coefficientes y ECM	xp	yp	UT1-UTC	dX	dY
$a_h[msa \cdot 10^5 km][ms \cdot 10^5 km]$	0,109	0,156	0,0058	0,007	0,023
$b_h[msa][ms]$	0,014	0,007	0,0037	0,102	0,068
$Ecm_h[msa][ms]$	0,040	0,105	0,0008	0,505	0,138
$a_i[msa/10^5 km][ms/10^5 km]$	-0,013	-0,019	0,0008	0,000	0,004
$b_i[msa][ms]$	0,092	0,119	0,0081	0,105	0,087
$Ecm_i[msa][ms]$	0,042	0,106	0,0007	0,505	0,137

**Tabla 5.5:** Coeficientes de las funciones y errores cuadráticos medios en cada ajuste sobre los datos de desvío en función de la longitud E-O de las sesiones.

Finalmente, se seleccionó la función con el menor ECM para cada EOP, la cual se aprecia en la figura 5.9 como una línea roja a trazos. En los casos tales que no exista diferencia entre los ECM, se ha priorizado la hipérbola porque al tender la  $LongitudEOs_r$  a 0, la cantidad de estaciones tiende a 0 y se supone que frente a esta situación el desvío tiende a infinito, como se explicó en el estudio de la cantidad de observaciones.

Por otra parte, se calculó el promedio de  $LongitudEOs_r$  para las sesiones por período considerado, dando como resultado lo que se muestra en la columna  $Long[km]$  de la tabla 5.6. A continuación, se determinó la desviación estándar asociada a cada promedio mediante su evaluación en las funciones ajustadas y los tomamos como representativo de su correspondiente período (puntos gruesos en la figura 5.12). Estos últimos resultados se muestran en la tabla 5.6 junto a las diferencias que hubo entre períodos y su variación porcentual ( $\frac{x_f - x_i}{x_i} \cdot 100\%$  donde  $x$  hace referencia al desvío representativo del parámetro estudiado, y los subíndices  $i$  y  $f$ , a que el valor que toma dicho parámetro es el del período más antiguo y más actual, respectivamente).

Período	Long [km]	xp[msa]	yp[msa]
Con TIGO	266215,690	0,055	0,065
Intermedio	346738,396	0,046	0,051
Con AGGO	312062,236	0,049	0,056
Dif.Int.-TIGO	80522,706(30,2 %)	-0,010(-17,3 %)	-0,014(-20,9 %)
Dif.AGGO-Int.	-34676,160(-10,0 %)	0,003(7,7 %)	0,005(9,7 %)
Dif.AGGO-TIGO	45846,546(17,2 %)	-0,006(-10,9 %)	-0,009(-13,2 %)

Período	UT1-UTC[ms]	dX[msa]	dY[msa]
Con TIGO	0,0061	0,104	0,077
Intermedio	0,0055	0,104	0,074
Con AGGO	0,0057	0,104	0,075
Dif.Int.-TIGO	-0,0006(-10,1 %)	-0,001(-0,6 %)	-0,003(-3,8 %)
Dif.AGGO-Int.	0,0003(4,8 %)	0,000(0,2 %)	0,001(1,7 %)
Dif.AGGO-TIGO	-0,0004(-5,7 %)	0,000(-0,4 %)	-0,002(-2,1 %)

**Tabla 5.6:** En las tres primeras filas, desviación estándar representativa de cada período en función de la  $LongitudEOs_r$ . En las últimas tres filas, la variación que sufre el desvío representativo período tras período incluyendo entre paréntesis la variación porcentual.

Si estudiamos los valores promedios, la dirección E-O de las líneas de base ha aumentado desde el período “Con TIGO” al período “Intermedio”, pero luego volvió a disminuir durante el período “Con AGGO”, quizás por causas de cambio de equipamiento, como en el caso de la transformación de algunas de las antenas australianas a VGOS (recordemos que no pueden realizar línea de base con

una antena Legacy S/X). Sin embargo esta disminución no es tan grande como el aumento que se da durante el paso del primero al segundo.

Por otra parte, de la tabla 5.6 es importante destacar que un aumento más marcado de la *LongitudEOS<sub>r</sub>* en la sesión le corresponde una mayor disminución del desvío en la estimación de los EOP.

Observando las variaciones porcentuales, los parámetros más influenciados por el cambio en la orientación son  $x_p$  e  $y_p$ , seguidos por UT1-UTC. Y en base a la observación de los gráficos 5.9,  $dX$  parece no ajustar bien a la curva seleccionada y por lo tanto, no guardar tanta relación con este factor como muestra su ECM en la tabla 5.5.  $dY$  tampoco presenta un ajuste adecuado, de hecho la pendiente de la recta ajustada es mínima. Esto hace pensar que  $dX$  y  $dY$  quizás presenten más dependencia con otro factor como es la distribución de las radiofuentes.

Teniendo en cuenta solo el efecto de este factor con las curvas ajustadas y los promedios calculados, la desviación estándar en la estimación de los EOP, disminuyó entre el período inicial y los dos que siguieron. Este cambio en la precisión puede ser atribuido gran parte al factor estudiado en esta sección.

### 5.4.3. Desviación estándar en función de líneas de base Norte-Sur

En esta sección se buscará alguna relación entre la desviación estándar en la estimación de los EOP con la cantidad de líneas de base con orientación predominantemente Norte-Sur (N-S) presente en cada sesión. El análisis tiene el objetivo de estudiar la influencia de este factor en la dispersión de la estimación y como esta ha evolucionado entre los tres períodos seleccionados. Se tomaron las estimaciones hechas en las 143 sesiones seleccionadas con anterioridad.

Debido a que no existen líneas de base puramente N-S, se calculó por sesión cual era la predominancia de estas en tal dirección. Para cada una de las sesiones se tomaron las líneas que superasen los 3500 km y en las que  $\Delta\varphi > 1.5\Delta\lambda$ . Luego, a cada una de ellas se les determinó la proyección N-S sobre alguno de los dos meridianos que pasa por las estaciones. Es decir que la longitud considerada para cada línea de base es la longitud medida sobre un arco de meridiano entre los paralelos que cruzan a ambas antenas como se puede ver en la figura 5.10.

Dicha descomposición en una línea de base entre la antena  $i$  y  $j$  se traduce a la expresión 5.4.3:

$$LongitudNS_{ij} = (|\varphi_i| - |\varphi_j|) \cdot 6371000m \quad (5.4.3)$$

donde  $\varphi_i$  es la latitud de la antena  $i$  en radianes y donde se tomó como radio medio terrestre a 6371 km.

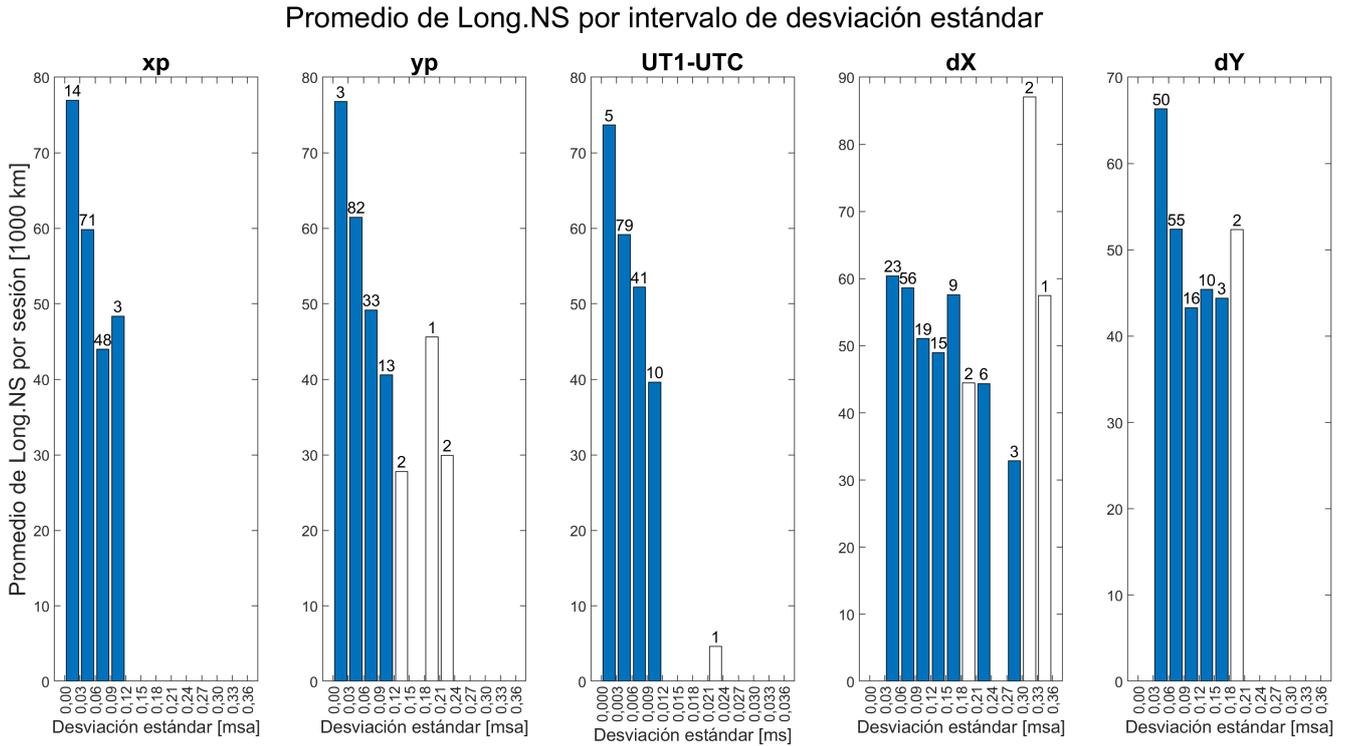
Finalmente, para cada sesión se calculó que tanto predominan sus líneas de base N-S haciendo la suma de todas las *LongitudEW<sub>ij</sub>*. Resultando que para la sesión  $r$  la longitud total considerada es:

$$LongitudNSs_r = \sum_{i,j=1}^{N,N} LongitudNS_{ij} \quad (5.4.4)$$

donde  $N$  es la cantidad de antenas participantes en la sesión  $r$ . Al igual que en el análisis E-O, no se consideraron las líneas de base excluidas previamente por los centros de análisis del IVS.

En la figura 5.13 se realizó un gráfico de barras análogo al de la sección anterior, donde se presentó por intervalo de desviación en la estimación de cada parámetro, el promedio de la *LongitudNSs<sub>r</sub>* de todas las sesiones cuyo análisis arrojó dicha precisión. Y donde aquí también sobre cada barra se indica que cantidad de sesiones de la muestra total han caído dentro de ese intervalo, y por lo tanto han

sido utilizadas para calcular el promedio. Las barras pintadas en blanco indican que su media podría no llegar a ser representativa de su respectivo intervalo, por la poca cantidad de sesiones (menor o igual a 2) involucradas en el cálculo.



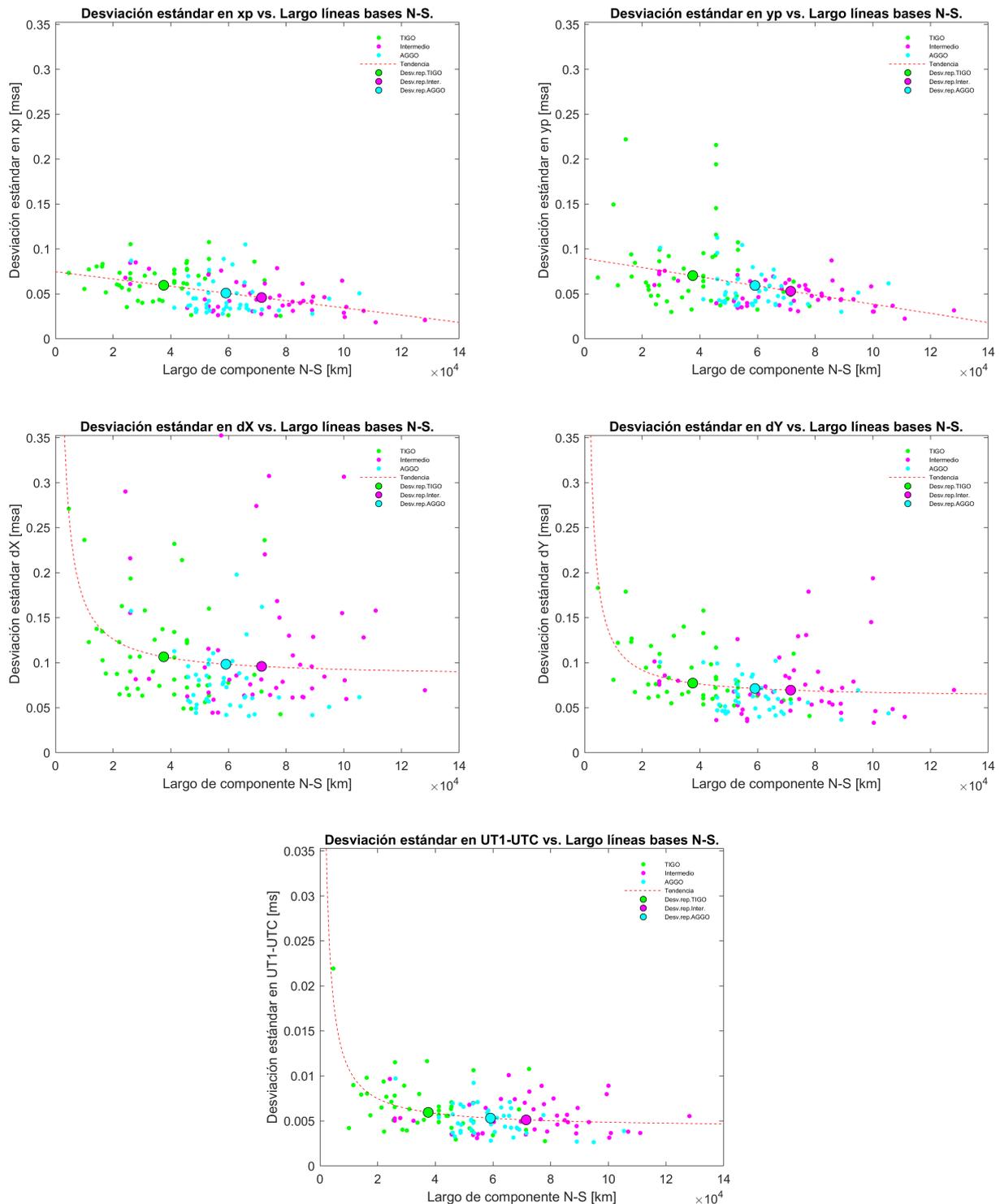
**Figura 5.13:** Promedio de  $LongitudNS_s_r$  de todas las sesiones cuya estimación presenta una desviación estándar en el rango presentado. Sobre cada barra se presenta la cantidad de sesiones que cayeron dentro de cada intervalo de desvío. En blanco, aquellas barras cuyo promedio fue calculado con 2 o menos sesiones.

Del análisis de esta última figura se desprende que para los parámetros de rotación, se aprecia un aumento de los desvíos conforme disminuyen las líneas de base N-S. Para dX, no se nota dicha tendencia y para dY, tampoco, quizás es más claro si no tomamos como representativas de sus respectivos intervalos a las barras de blanco.

En los gráficos 5.14 se muestran las desviaciones estándar en la estimación de los EOP en función de la  $LongitudNS_s_r$ . De forma análoga a lo que hicimos en las secciones anteriores y debido a la observación hecha en el párrafo anterior, buscamos una función decreciente para ajustar a cada set de datos mediante mínimos cuadrados. Se han analizado las siguientes dos funciones: una con comportamiento hiperbólico de la forma  $Desviación\ estándar = b_h + a_h/LongitudNS_s_r$  y otra con comportamiento lineal de la forma  $Desviación\ estándar = b_l + a_l \cdot LongitudNS_s_r$ . En la tabla 5.7, se muestra el valor de estos coeficientes y el error cuadrático medio para cada ajuste.

Coefficientes y error	xp	yp	UT1-UTC	dX	dY
$a_h [msa \cdot 10^5 km]$	0,003	0,004	0,0007	0,008	0,006
$b_h [msa][ms]$	0,045	0,051	0,0042	0,084	0,061
$Ecm_h [msa][ms]$	0,051	0,127	0,0005	0,459	0,114
$a_l [msa/10^5 km][ms/10^5 km]$	-0,040	-0,051	-0,0034	-0,032	-0,037
$b_l [msa][ms]$	0,075	0,089	0,0077	0,122	0,096
$Ecm_l [msa][ms]$	0,044	0,118	0,0007	0,497	0,128

**Tabla 5.7:** Coeficientes y errores cuadráticos medios en cada ajuste para a los datos de desvío en función de la longitud N-S de las sesiones.



**Figura 5.14:** Gráficos de desviación estándar vs.  $LongitudNs_{s_T}$ . Los desvíos han sido graficados con puntos de distintos colores según al período que correspondan. Además, se adicionas una función ajustada en rojo y los desvíos representativos a cada período con puntos gruesos.

Finalmente, se seleccionó la función con el menor ECM para cada EOP utilizando el mismo criterio que en las secciones pasadas y se la graficó en las figuras 5.14 con una línea roja. Los ECM para dX y, en menor medida, para dY son mayores que para los parámetros de rotación, al igual que cuando analizamos el caso de las líneas de base Este-Oeste.

Por otra parte, se calculó en promedio la  $LongitudNSs_r$  para las sesiones en cada período considerado, dando como resultado lo que se muestra en la columna  $Long[km]$  de la tabla 5.8. Finalmente, se determinó cuanto es la desviación estándar que le corresponde a cada promedio según la función seleccionada (puntos gruesos en la figura 5.14), y se los tomó como representativo de cada período correspondiente. Estos últimos resultados se muestran en la tabla 5.8 junto a las diferencias que hubo entre períodos y su variación porcentual calculada de manera similar que en el caso del estudio de los factores anteriores.

Período	Long [km]	xp[msa]	yp[msa]
Con TIGO	37536,707	0,059	0,070
Intermedio	71499,829	0,046	0,053
Con AGGO	59120,347	0,051	0,059
Dif.Int.-TIGO	33963,122(90,5 %)	-0,013(-23,0 %)	-0,017(-24,7 %)
Dif.AGGO-Int.	-12379,482(-17,3 %)	0,005(10,9 %)	0,006(11,9 %)
Dif.AGGO-TIGO	21583,640(57,5 %)	-0,009(-14,6 %)	-0,011(-15,7 %)

Período	UT1-UTC[ms]	dX[msa]	dY[msa]
Con TIGO	0,0059	0,106	0,077
Intermedio	0,0051	0,096	0,069
Con AGGO	0,0053	0,098	0,071
Dif.Int.-TIGO	-0,0008(-14,0 %)	-0,011(-10,0 %)	-0,008(-10,1 %)
Dif.AGGO-Int.	0,0002(3,8 %)	0,002(2,6 %)	0,002(2,6 %)
Dif.AGGO-TIGO	-0,0006(-10,7 %)	-0,008(-7,7 %)	-0,006(-7,8 %)

**Tabla 5.8:** En las tres primeras filas, desviación estándar representativa de cada período en función de la  $LongitudNSs_r$ . En las últimas tres filas, la variación que sufre el desvío representativo período tras período incluyendo entre paréntesis la variación porcentual.

La cantidad de líneas de base con orientación N-S han aumentado desde el período “Con TIGO” al período “Intermedio” por casi el doble, pero luego volvió a disminuir en el período “Con AGGO” pero sin ponerse por debajo del primero, dando una idea de que se perdieron ciertas líneas de base N-S probablemente por el cambio de equipamiento y de configuración de la red (por ejemplo, la antena de la estación Westford en Estados Unidos no puede realizar línea de base con AGGO, por cambio a la nueva tecnología VGOS por parte de ella). Desde “Con TIGO” a “Con AGGO” la orientación N-S ha aumentado en un 57,5 %.

Hay que destacar que un aumento más marcado de  $LongitudNSs_r$  le corresponde un aumento mayor de precisión en la estimación de los EOP.

Si analizamos las variaciones porcentuales, el parámetro más afectado por la variación de esta orientación es xp e yp, y los menos influenciados son los offsets del polo celeste. Esto es debido a que dX no parece ajustar nada bien a la curva seleccionada indicando un ECM alto y no guardar relación con este factor. Tanto dX, como dY sufren mayor dependencia con la distribución de las fuentes y con algunos de los otros modelos seleccionados.

Por otro lado se pudo hacer el mismo comentario que para el caso de E-O. Teniendo en cuenta solo el efecto de la  $LongitudNSs_r$ , con las curvas ajustadas y los promedios calculados, la desviación estándar en la estimación de los EOP disminuyó desde el período inicial al último. Este cambio en la precisión puede ser atribuido en gran parte al factor N-S estudiado en esta sección y representa un motivo por el cual la precisión varía con el tiempo.

#### 5.4.4. Desviación estándar en función de la distribución homogénea de antenas

En esta sección se buscará cierta relación entre la desviación estándar en la estimación de los EOP con alguna variable que describa qué tan buena es la distribución de antenas en cada sesión,

entendiendo como buena a una distribución homogénea. El objetivo es estudiar qué tanto influye este factor en la precisión de dicha estimación y cómo evoluciona entre los tres períodos seleccionados. Para este estudio se tomaron las estimaciones hechas en las mismas 143 sesiones seleccionadas con anterioridad.

Para cuantificar que tan buena es la distribución de un conjunto de  $n$  antenas,  $\omega_n$ , de determinada sesión  $r$  haremos uso de la expresión propuesta por Whyte (1952):

$$\varepsilon_r^{\log}(\omega_n) = \log \prod_{i \neq j} \frac{1}{\|c_i - c_j\|} \quad (5.4.5)$$

que describe la “Energía logarítmica”,  $\varepsilon_r^{\log}(\omega_n)$ , a partir de las coordenadas de las antenas,  $c_i = (x_i, y_i, z_i)$ , y de la norma,  $\|\cdot\|$ , que en nuestro caso al tratarse de un espacio euclídeo  $\mathbb{R}^3$  es igual a  $\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$ . Notar que un par de antenas cuanto más alejadas están entre sí, más grande será el valor de la norma de su diferencia de coordenadas y pues, dicha línea de base contribuirá a disminuir el valor de  $\varepsilon_r^{\log}(\omega_n)$ . Por lo tanto, si consideramos que en una distribución homogénea, las distancias entre las antenas debe ser lo mas grande posible, entonces un valor pequeño de  $\varepsilon_r^{\log}(\omega_n)$  describirá una buena distribución.

La expresión 5.4.5 surge de una más general denominada “Energía de Riesz”,

$$\varepsilon(\omega_n) = \sum_{i \neq j} \frac{1}{\|x_i - x_j\|^s} \quad (5.4.6)$$

donde a  $s$  se la hizo tender a 0. Pero, por ejemplo, si fuese el caso de  $s = 1$ , esta definición se reduce al problema de Thomson, quien buscaba como se distribuirían homogéneamente los electrones de su modelo de átomo, representado por una esfera de carga positiva con electrones en su superficie. Para ello buscó cuál sería la distribución de electrones que hacía mínima la energía potencial electrostática, es decir cual era la que minimizaba la expresión 5.4.6 con  $s = 1$  (Beltrán Álvarez, 2020).

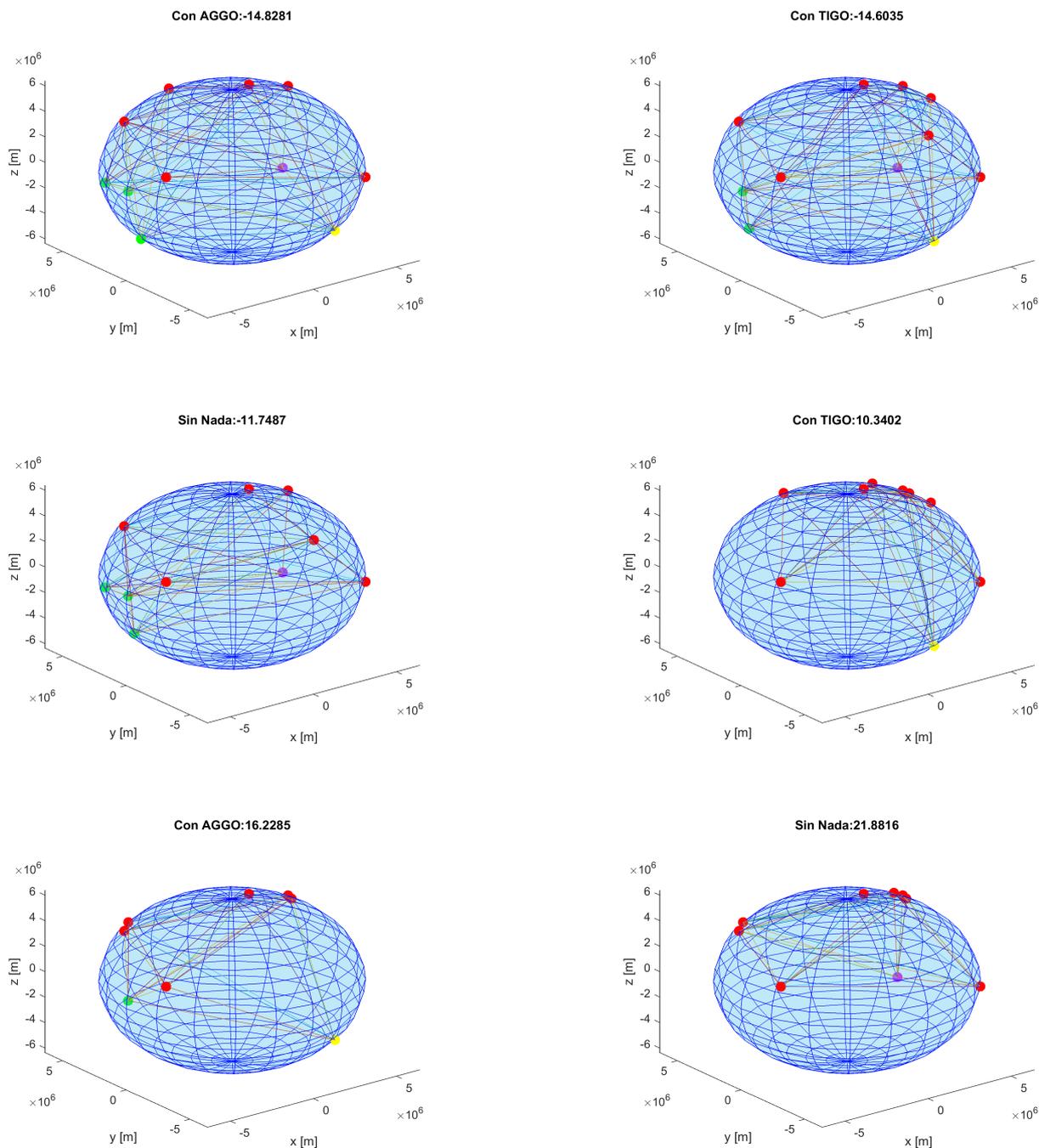
Se ha demostrado que una sucesión de familias de  $n$  puntos sobre la esfera,  $\omega_n$ , con  $n = 1, 2, \dots$ , que minimizan la expresión 5.4.6, con  $0 \leq s \leq 2$  está asintóticamente uniformemente distribuida. Esto significa que cuando  $n \rightarrow \infty$ , si tomamos cualquier subconjunto  $C$  de la superficie esférica, el porcentaje de puntos que caen dentro de  $C$  es igual al porcentaje del área que ocupa  $C$  en la superficie total. Una explicación más rigurosa desde el punto de vista matemático se encuentra en la sección 1.1.2 de la tesis doctoral de Rodríguez (2019), la cual se fundamenta en lo expuesto por Kuipers y Niederreiter (2012)

En el caso de que tengamos 2 puntos,  $n = 2$ , la distribución que minimiza  $\varepsilon_r^{\log}(\omega_n)$  se da cuando ambos puntos se encuentran en las antípodas, para  $n = 3$  los puntos forman un triángulo equilátero,  $n = 12$  forma un icosaedro, y por ejemplo, para  $n = 7$  no se sabe cual es dicha distribución.

En este trabajo, para el cálculo de  $\varepsilon_r^{\log}(\omega_n)$  a las coordenadas de las antenas se las proyectó sobre la esfera unidad.

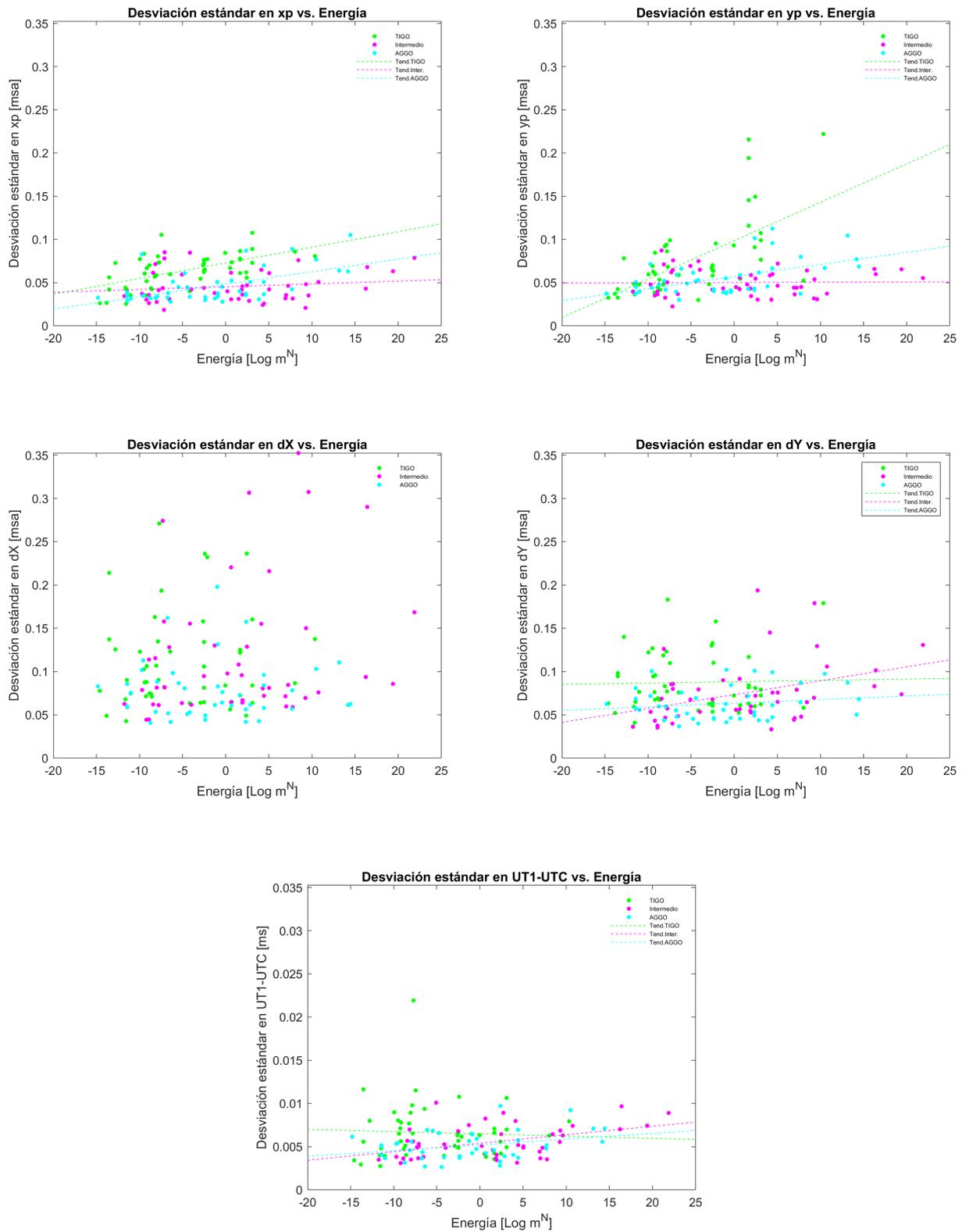
En la figura 5.15 se observan diferentes sesiones con su índice de energía. Notar que las sesiones con energía más baja están mejor distribuidas en la superficie terrestre, en contraste con las de mayor energía.

Con verde han sido marcadas las antenas en Oceanía, con magenta, HART15M, y con amarillo, TIGO y AGGO. Es notable que para las sesiones con mayor índice de energía, la cantidad de antenas en el hemisferio sur decae considerablemente, y esto se debe principalmente a la ausencia de antenas participantes en Oceanía.



**Figura 5.15:** Ejemplos de distribuciones de antenas y sus energías logarítmicas. De arriba hacia abajo, de izquierda a derecha, se presentan las sesiones correspondientes a los días de los sinex 19APR04XA, 12JUL30XA, 14JUN23XA, 12DEC27XE, 20MAR02XA, 17JAN03XA y sus valores de energía.

Siguiendo la línea de análisis de las demás secciones, se graficó la desviación estándar en la determinación de los EOP en función de la energía en la figura 5.16.



**Figura 5.16:** Gráficos de desviación estándar vs. Energía logarítmica.

En esta sección se estudió a la estimación de cada EOP período por separado pudiendo así ajustar a cada set de datos, mediante mínimos cuadrados, una función con comportamiento lineal de la forma  $Desviación\ estándar = b_{lin} + a_{lin}$ . Los errores cuadráticos medios, ECM, asociados a cada ajuste se presentan en la tabla 5.9.

Ecm	xp[msa]	yp[msa]	UT1-UTC[ms]	dX[msa]	dY[msa]
Con TIGO	0,0115	0,0573	0,00048	0,1424	0,0531
Sin Nada	0,0138	0,0100	0,00013	0,2512	0,0489
Con AGGO	0,0102	0,0121	0,00010	0,0486	0,0144

**Tabla 5.9:** Errores cuadráticos medios en cada ajuste sobre los datos de desvío en función de la energía logarítmica.

De la tabla 5.9 se desprende que es posible ajustar rectas a todos los parámetros a excepción de dX. Por ello, en la figura 5.16 no se han graficado las rectas para dX. Las coordenadas del polo son las que muestran una mejor relación lineal con la energía siendo esta de pendiente positiva, según lo planteado.

Coefficientes a	xp [ $\frac{msa}{Log(m^N)}$ ]	yp [ $\frac{msa}{Log(m^N)}$ ]	UT1-UTC [ $\frac{ms}{Log(m^N)}$ ]	dX [ $\frac{msa}{Log(m^N)}$ ]	dY [ $\frac{msa}{Log(m^N)}$ ]
Con TIGO	0,002	0,004	-0,0000	0,000	0,000
Intermedio	0,000	0,000	0,0001	0,003	0,002
Con AGGO	0,001	0,001	0,0001	0,000	0,000

**Tabla 5.10:** Pendientes de las rectas del ajuste a la energía. En el denominador de la unidad  $m^N$  se refiere a metros a la cantidad de antenas involucradas (N).

Para ver una relación más general que integre a todos los datos de todos los períodos y así ajustar tan solo una curva a este conjunto, se debería adicionar más estimaciones provenientes de sesiones más antiguas y con menor precisión, ya que de esta manera se podría ampliar el intervalo de tiempo y obtener una mayor variabilidad de la desviación estándar para ver en que rango de energía caen.

A partir de las tablas mostradas en esta sección y de los gráficos expuestos podemos notar que la relación entre la energía y la desviación estándar en la estimación de UT1-UTC y de los offsets del polo celeste no poseen correlación alguna como es en el caso de las coordenadas del polo, xp e yp, quienes disminuyen su precisión al aumentar la energía. Al igual que en los otros casos, se podría estudiar algún otro factor del cual pueda depender la precisión de la estimación de dX y dY, como es el caso de la distribución de las radiofuentes.

## 5.5. Comparación entre factores

En esta sección se presentará una comparación de la influencia en la precisión de los EOP de los tres primeros factores mencionados con anterioridad. Se excluirá a la energía logarítmica ya que esta muestra un comportamiento diferente a los anteriores. Este análisis surge a raíz de preguntarse lo siguiente: ¿Todos estos factores mejoran o degradan de igual manera a la estimación de los EOP? ¿Cuál es el más o menos influyente?

Cabe destacar que todos los factores no son mutuamente excluyentes, es decir que puede existir cierta correlación entre ellos. Por ejemplo, un aumento en la cantidad de observaciones implica necesariamente un aumento en la cantidad de líneas de base con orientación E-O o N-S.

En la tabla 5.11 se muestran las variaciones de la desviación estándar al pasar del período “Con TIGO” al período “Con AGGO” debido los factores considerados (tablas 5.4, 5.6 y 5.8).

Las casillas verdes de la tabla 5.11 indican que al pasar del período “Con TIGO” al último, la precisión en la estimación de los EOP, debiera aumentar de acuerdo al factor determinado. Por otro lado, cabe destacar que para dX, el estudio no ha sido realizado ya que, como vimos, las curvas ajustadas presentan un alto ECM y por lo tanto, estas no son representativas del conjunto de datos.

Viendo la tabla 5.11, se debe destacar que la precisión la estimación de los EOP, es más influyente la cantidad de observaciones en la sesión que los demás factores, excepto en yp donde el más

AGGO-TIGO	xp [msa]	yp [msa]	UT1-UTC [ms]	dX [msa]	dY [msa]
Nro. de observaciones	0,009	0,009	0,0012	–	0,015
Líneas E-O	0,006	0,009	0,0004	–	0,002
Líneas N-S	0,009	0,011	0,0006	–	0,006

**Tabla 5.11:** Influencia de los parámetros sobre la diferencia AGGO-TIGO

influyente son las líneas de base N-S.

Por otro lado, se debe destacar que para el caso de UT1-UTC, su estimación ha sido más beneficiada por el aumento de las líneas de base N-S que E-O. A pesar de esto, se tiende a pensar que en UT1-UTC debería estar más influenciado por las líneas de base E-O, sin embargo, el estudio publicado por Schartner *et al* (2021) muestra que la precisión de UT1-UTC no se sostiene sólo por líneas de base ecuatoriales, largas y en sentido E-O sino que las líneas de base N-S también son muy necesarias para mejorar este parámetro.

## 5.6. Conclusión

La tabla 5.12 presenta un listado de las líneas de base sostenidas por AGGO y por TIGO durante sus respectivos períodos. Se ha tratado de poner en un mismo renglón, las líneas de base que tienen en común.

Líneas de base con TIGO	Líneas de base con AGGO
FORTLEZA-TIGOCONC	AGGO-FORTLEZA
HARTRAO-TIGOCONC	
HART15M-TIGOCONC	AGGO-HART15M
KATH12M-TIGOCONC	AGGO-KATH12M *
KOKEE-TIGOCONC	AGGO-KOKEE
NYALES20-TIGOCONC	AGGO-NYALES20
TIGOCONC-WESTFORD	
TIGOCONC-WETTZELL	AGGO-WETTZELL
TIGOCONC-YEBES40M	AGGO-YEBES40M
	AGGO-WETTZ13N
HOBART12-TIGOCONC	
HOBART26-TIGOCONC	AGGO-HOBART26
ONSALA60-TIGOCONC	AGGO-ONSALA60
TIGOCONC-WARK12M	AGGO-WARK12M
MATERA-TIGOCONC	AGGO-MATERA
	AGGO-NOTO
TIGOCONC-TSUKUB32	
	AGGO-ZELENCHK
	AGGO-SVETLOE

**Tabla 5.12:** Líneas de base con TIGO y AGGO en los períodos considerados.

\*línea de base existente hasta julio del 2020.

Se aprecia en ambos casos, que tanto AGGO como TIGO han participado de 15 líneas de base en sus respectivas épocas, aunque no siempre éstas han involucrado a las mismas estaciones, por ejemplo, AGGO nunca observó conjuntamente con WESTFORD, en cambio, TIGO sí lo ha hecho. De las 15 líneas de base, solo 10 han sido en común. Y por lo tanto podemos señalar que un aumento en la cantidad de estaciones, como vimos en el caso del período “Con AGGO”, no implica siempre un

aumento en la cantidad de líneas de base para una misma estación.

Aquellas líneas realizadas íntegramente en el hemisferio sur por TIGO fueron 7, en cambio por AGGO fueron 5 considerando a KATH12M, por lo que luego de julio del 2020 fueron 4, ya que esta última estación mencionada dejó de operar en modo S/X Legacy y pasó a operar en VGOS.

En las tablas 5.13 y 5.14, se muestran las estaciones con las que tanto TIGO como AGGO han hecho líneas de base con orientación estrictamente N-S y E-O, respectivamente. Siendo que para el primer caso AGGO presentó una menos y para el segundo, dos menos.

Líneas de base con TIGO	Líneas de base con AGGO
FORTLEZA	FORTLEZA
NYALES20	NYALES20
WESTFORD	

**Tabla 5.13:** Líneas de base hechas por TIGO y AGGO de orientación estrictamente N-S en los períodos considerados.

Líneas de base con TIGO	Líneas de base con AGGO
HART15M	HART15M
KATH12M	KATH12M
HOBART26	HOBART26
WARK12M	WARK12M
HOBART12	
HARTRAO	

**Tabla 5.14:** Líneas de base hechas por TIGO y AGGO de orientación estrictamente E-O en los períodos considerados.

Es decir, que ha disminuido el número de líneas de base que incluyen a AGGO en ambos sentidos, siendo que conforma aún muchas menos que TIGO en E-O y que a partir de julio del 2020, esta reducción pasó a ser incluso, la mitad. Sin embargo hemos visto en las secciones 5.4.2 y 5.4.3, que la tendencia general de cada sesión a ser más E-O o N-S ha aumentado desde que estuvo TIGO a cuando estuvo AGGO. Por lo que se puede inferir que el aumento en el número de estaciones, mencionado en la sección 5.4.1, se debe a la incorporación de nuevas antenas cuya orientación con respecto a AGGO o TIGO no ha sido estrictamente N-S o E-O. Todo esto indica que ha habido un cambio en la geometría de la red.

Este cambio notable en la distribución y en el aumento de estaciones podrían ser las razones detrás de la variación en la precisión de la estimación de los EOP, desde el período “Con TIGO” hasta “Con AGGO”.

Por otro lado, los parámetros no mejoraron significativamente entre el segundo y último período, como se vio en la sección 5.3. Se observó en este trabajo que la cantidad de observaciones ha aumentado junto al incremento del número de antenas participantes pero a pesar de ello se han perdido líneas de base importantes y la cantidad de ellas predominantemente N-S o E-O ha disminuido haciendo que la desviación estándar aumente (secciones 5.4.2 y 5.4.3). Por lo tanto, la disminución de la precisión en  $x_p$  e  $y_p$  al pasar del período “Intermedio” a “Con AGGO”, puede ser explicado por un cambio en la geometría de la red que pudo aportar negativamente y en que la cantidad de observaciones no ha aumentado considerablemente. Aunque para UT1-UTC y dY sí ha mejorado la estimación, esta no ha sido significativo.

Para dX, debemos hacer la salvedad de que los datos estudiados sobre la precisión no tienen correlación alguna con los factores relacionados con la geometría de la red, incluso, en el ECM del ajuste de las curvas en función de las observaciones (tabla 5.3) es mucho menor que aquel en función de las líneas de base E-O y N-S (tablas 5.5 y 5.7), lo que hace inferir que el mejoramiento que se ve

entre el período “Intermedio” al período con “Con AGGO” se puede deber al aumento de observaciones o de estaciones.

De este capítulo se desprende que los parámetros más sensibles a los cambios de geometría son los parámetros de rotación terrestre ( $x_p$ ,  $y_p$ , UT1-UTC), ya que los menores ECM en el ajuste de las curvas del desvío frente a los factores estudiados se dan en estos parámetros que en el resto de los EOP.

Por último vale decir que para confirmar estos resultados en cada época, sería conveniente repetir este análisis a partir de soluciones globales.

## Capítulo 6

# Simulación y análisis de impacto de AGGO como VGOS

### 6.1. Motivación del análisis

En el capítulo 5 hemos analizado los resultados de ciertas sesiones R1/R4 de diferentes épocas con el objetivo de determinar si en el período de mediciones de las estaciones TIGO y AGGO existe o existió alguna diferencia considerable en la estimación de los EOP con respecto a la estimación hechas para otras épocas.

Aquí el foco ya no son las sesiones con equipos Legacy, sino aquellas con tecnología VGOS. En este capítulo plantearemos distintas redes de antenas VGOS con una cantidad similar a las actualmente activas, pero con una configuración diferente con el fin de analizar si existe alguna mejor distribución que favorezca a la estimación de los EOP. En particular, se analizará qué ocurre al respecto si se incluyen estaciones en el hemisferio sur con antenas convertidas a VGOS tales como AGGO, entre otras.

Con el paso del tiempo, se observa que se van perdiendo líneas de base que involucren a AGGO ya que estaciones como las australianas pasarán a operar en modo VGOS, como lo han hecho otras como Westford. Hemos visto en la sección 5.4.4 que las líneas de base de AGGO con antenas de Oceanía son mucho menos que las hechas por TIGO y en un futuro, si la tecnología de AGGO no evoluciona, es posible que esta cantidad siga en disminución.

En las siguientes secciones nos valdremos de la simulación de algunas sesiones, a partir de las cuales analizaremos el impacto de contar con AGGO como antena VGOS en el hemisferio sur, tal como se desprende del trabajo de Gomez y Fernández (2022) y Hase y Pedreros (2014). Para eso utilizaremos el software VieSched++ (Schartner y Böhm, 2019b) y crearemos un conjunto de tres redes en las que analizaremos qué sucede al incluir o no AGGO.

### 6.2. Software utilizado

Como ha sido mencionado, el software utilizado para el estudio de este capítulo es VieSched++ (Schartner y Böhm, 2019b), escrito en C++, cuyo principal objetivo es planificar sesiones, es decir, crear schedules. Estos schedules varían según el número de antenas, el número de radiofuentes, sus características, la duración de la sesión y otros factores, que finalmente determinan el número de observaciones por scans y la cantidad de ellos en una sesión. Cada sesión se puede planificar directamente o utilizar la herramienta de multi-scheduling, donde se crean varios schedules que junto con el segmento de simulación permiten seleccionar el mejor a partir de la estadística que provee el programa.

VieSched++ cuenta con una herramienta para la simulación basado en el método de Monte Carlo, permitiendo simular el resultado de la etapa del análisis a posteriori de cada schedule. Por lo que si buscamos comprender cuál es el schedule que mejores resultados arrojaría, podemos analizar la repetibilidad de los diferentes parámetros derivados de la simulación del análisis, como por ejemplo aquella dada para los EOP.

### 6.3. Simulación de sesiones VGOS

En la actualidad las sesiones VGOS solo incluyen 9 antenas bien distribuidas en longitud, pero todas se encuentran ubicadas en el hemisferio norte (ver figura 6.1). Eso implica, no sólo una deficiencia en la cobertura de estaciones sino también de radiofuentes, ya que el catálogo de estas involucradas en las sesiones sólo incluye aquellas por encima de los 45° Sur.

A continuación simularemos 3 sesiones que involucran no solo a varias de las actuales antenas VGOS sino que se incluyen otras más, tanto en el hemisferio norte como en el sur, que tienen en sus planes la conversión a la nueva tecnología. A estas últimas, incluyendo a AGGO, se las analizarán como si fueran VGOS.

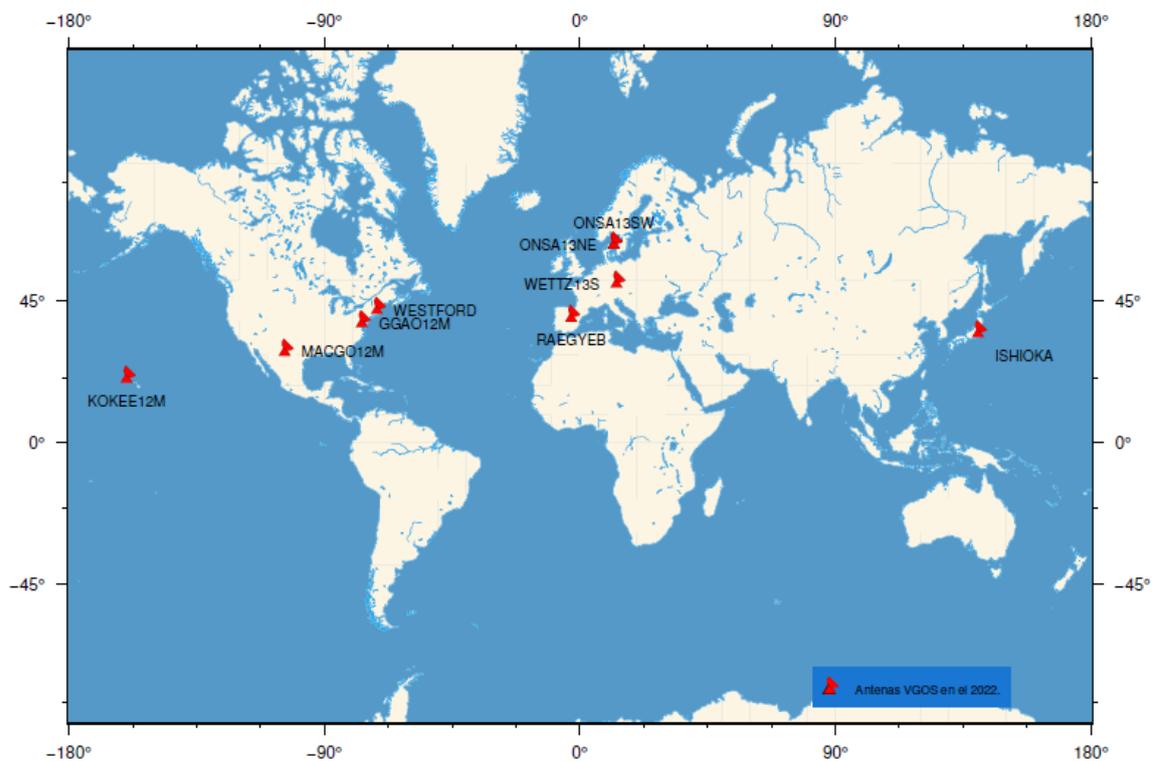
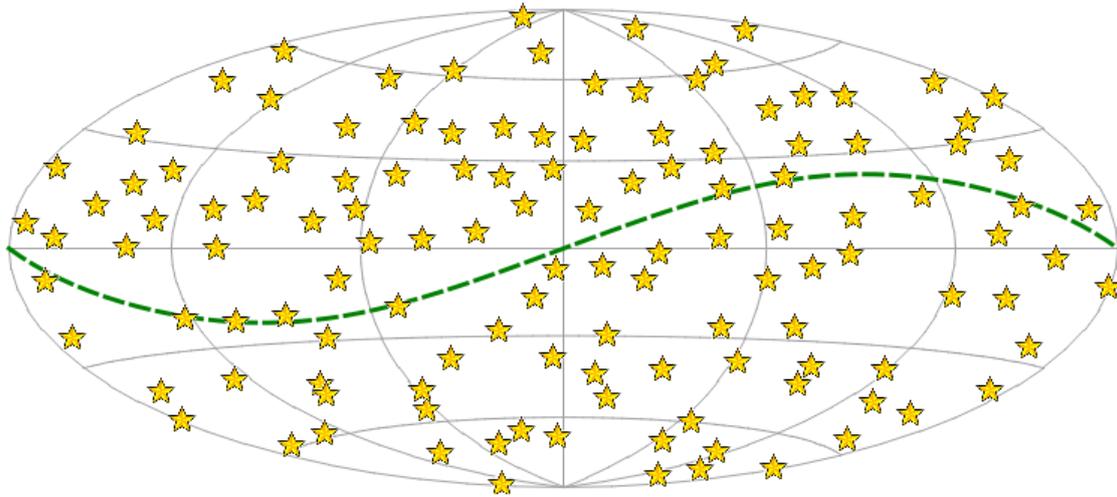


Figura 6.1: Antenas con tecnología VGOS durante el 2022.

### 6.4. Preparación de catálogos y estaciones seleccionadas

La ejecución de VieSched++ requiere completar archivos de entrada llamados catálogos. Estos contienen información de las antenas, su ubicación, su equipamiento, las frecuencias y modos en que operan, entre otros datos. También hay un archivo referido a las radiofuentes, que en el caso de este estudio, será el mismo utilizado para las sesiones VGOS, pero al que se le agregaron 27 radiofuentes más por debajo de los 45°S (ver figura 6.2). Estas últimas han sido elegidas del listado del ICRF3

(Charlot *et al*, 2020), las cuales emiten en bandas S/X y son consideradas de definición.



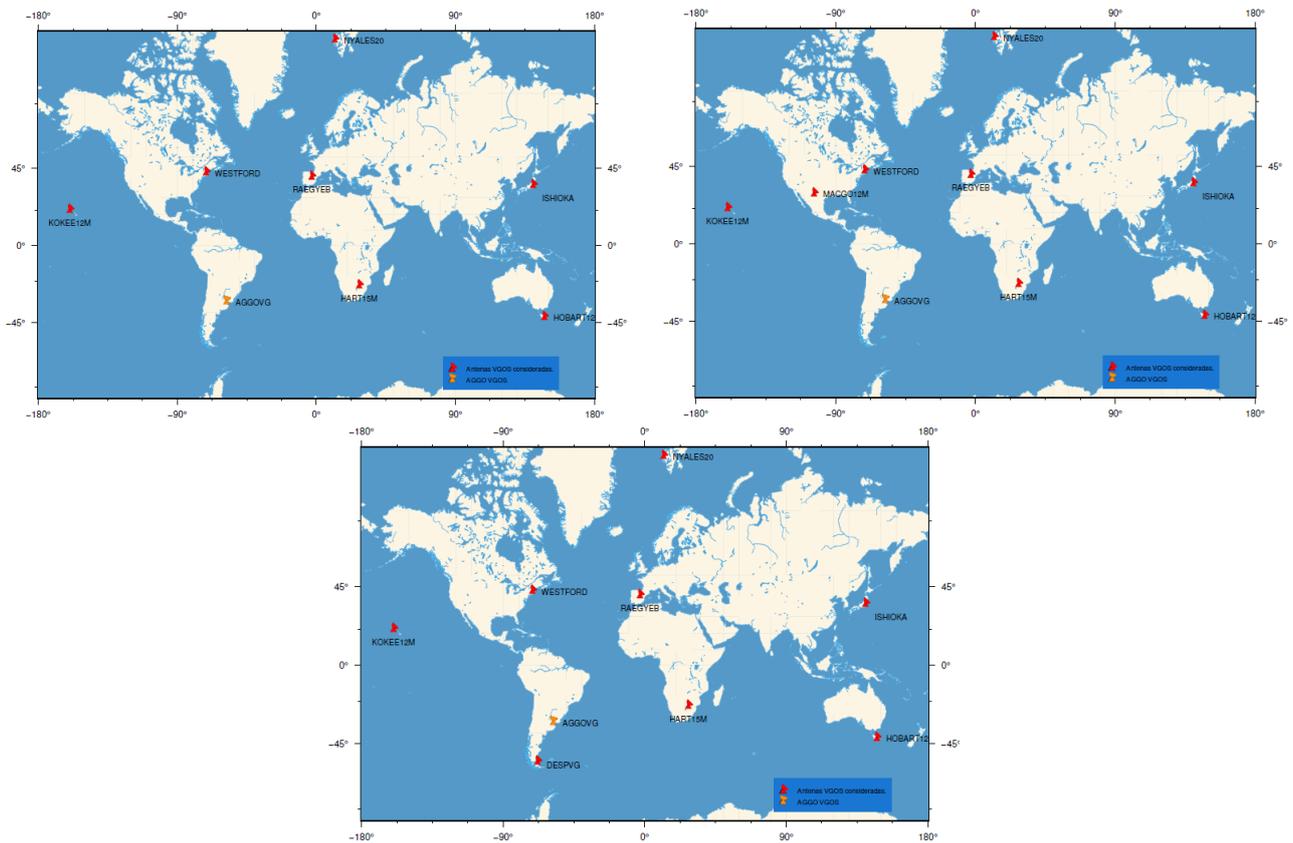
**Figura 6.2:** Mapa de radiofuentes utilizadas durante la simulación.

Para este trabajo se han planificado y simulado un total de 7 sesiones, cada una de ellas con una red distinta de antenas que son listadas en la tabla 6.1. Se lo ha hecho para el conjunto actual de estaciones VGOS (ver figura 6.1), cuya sesión denominaremos Sesión 0, y para otras 3 redes ficticias en las cuales todas sus antenas, inclusive AGGO, son consideradas con tecnología VGOS (ver figura 6.3). A estas últimas las llamaremos sesiones 1a, 2a y 3a. A cada una de estas tres sesiones planificadas se le ha asociado una análoga en la que, a diferencia de la sesión “original”, AGGO no se encuentra presente, y a las cuales llamaremos 1b, 2b y 3b. De esta manera esperamos medir el impacto de contar con AGGO, o no, según la geometría de la red. Si bien en un futuro probablemente todas o la mayoría de las actuales antenas cuenten con tecnología VGOS permitiendo realizar sesiones de hasta 15 antenas, en este trabajo hemos optado por considerar un número de antenas similar a la cantidad actual de VGOS, pero con una geometría que cubre mejor al globo. Esto nos permitirá evaluar el impacto que tendría una configuración de entre 8 y 9 antenas con esta nueva tecnología pero con una distribución que involucrara una mejor geometría que la actual.

A aquellas antenas que en la actualidad aun no son VGOS, le hemos asignado equipamiento, frecuencia y modos de observación coincidentes con la estación de Ishioka, tal como en el trabajo de Gomez y Fernández (2022). Para el resto de las antenas realmente VGOS, hemos respetado el equipamiento listado en los catálogos. Se muestra en los mapas de la figura 6.3 las redes de antenas empleadas según las sesiones seleccionadas.

Sesión 0	Sesión 1a	Sesión 2a	Sesión 3a
KOKEE12M	KOKEE12M	KOKEE12M	KOKEE12M
WESTFORD	WESTFORD	WESTFORD	WESTFORD
RAEGYEB	RAEGYEB	RAEGYEB	RAEGYEB
ISHIOKA	ISHIOKA	ISHIOKA	ISHIOKA
GGAO12M	HOBART12	HOBART12	HOBART12
ONSA13NE	HART15M	HART15M	HART15M
ONSA13SW	NYALES20	NYALES20	NYALES20
MACGO12M	AGGO*	MACGO12M	DESPVG
WETTZ13S		AGGO*	AGGO*

**Tabla 6.1:** Antenas participantes en cada sesión programada. \* En el caso de AGGO no se encuentra en las sesiones “b”



**Figura 6.3:** Mapa de antenas participantes en cada simulación. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 1a, 2a, 3a

Teniendo en cuenta que el estudio apunta hacia el impacto en los EOP según la geometría de la red, el modo utilizado ha sido el mismo que para las sesiones R1/R4 y además, en todos los casos se ha permitido dividir a la red en subredes (conocido como subnetting) que se comportan de manera independiente y con un mínimo de tres scans (conjunto de observaciones a una misma radiofuente entre cada par de antenas) por radiofuente.

## 6.5. Configuración del software

Cada schedule es hecho a partir de un conjunto de pesos asignados a varios factores que se involucran al momento de preparar los mismos, en el caso de este estudio estos son el número de observaciones, la cobertura de cielo, la duración de la observación relacionada con el tiempo que tarda la antena en moverse, y el tiempo de ocio. Al final obtendremos resultados por cada schedule proveniente de un conjunto particular de pesos de todas sus combinaciones posibles.

El software, como se mencionó anteriormente, tiene la particularidad de permitir realizar las simulaciones con el método Monte Carlo, variando los valores de la señal de entrada a través de la adición de 1000 secuencias aleatorias de ruido blanco. Luego de simular estas 1000 pruebas, se obtiene la repetibilidad en la estimación de cada parámetro procedente de cada schedule, y cuyo valor cuanto más bajo, mejor. El resultado de la simulación es un conjunto de valores estadísticos para cada EOP y para otros parámetros como las coordenadas de las estaciones, según se haya configurado la simulación. Al finalizar, a cada schedule le es asignado un ratio que permite seleccionar al mejor entre todos. Por supuesto, esto es sólo orientativo, ya que es el operario quien decidirá cual es el schedule más apropiado en función de los parámetros de interés.

Resumiendo, el resultado de la simulación es producto de un análisis llevado a cabo por el

software sobre la salida de la simulación de cada schedule. Existen por cada sesión tantos resultados como posibles combinaciones de pesos existentes, asignados a los factores mencionados en el primer párrafo de esta sección.

El software tiene una herramienta gráfica de análisis en el que el usuario puede determinar por sí mismo cuál es la configuración de determinada sesión que posee la mejor performance. Esta performance se determina en función de la repetibilidad resultante para cada uno de los parámetros a determinar, en este caso los EOP.

Debido a que la repetibilidad se obtiene como resultado de un análisis que lleva a cabo el mismo software, la parametrización seguida en cada simulación es la que se lista en la tabla 6.2, siendo que los valores están de acuerdo con los propuestos por Pany *et al* (2010) y Nilsson *et al* (2007) para observaciones VGOS. Dichos parámetros establecen señales de entrada para la simulación haciéndolas dependientes de la estado de la atmósfera. En la fila de Ruido blanco de la tabla 6.2 se da la varianza de los ruidos que se le adicionan a cada señal.

Parámetro	Valores
Ruido blanco	2,83 ps
Desviación de Alan	$1 \times 10^{14} s$ en 50 min
Turbulencia troposférica	$1.8 \times 10^{-7} / m^{1/3}$
Escala de altura	2 km
Velocidad del viento	8 m/s (dirección este)
Gradiente troposférico	cada 30 min
Cond EOP	0.1 $\mu s$

**Tabla 6.2:** Configuración de la simulación y análisis en VieSched++ para una sesión VGOS.

## 6.6. Resultados de la simulación

Luego de haber simulado las 7 sesiones mencionadas en la sección 6.4, donde cada una de estas nos arrojó 53 resultados posibles provenientes de cada schedule con una combinación diferente de pesos, como se explicó en la sección 6.5, elegimos aquel resultado por sesión con la menor repetibilidad en los EOP, pero teniendo en cuenta que la cantidad de observaciones hechas sea alta. En la tabla 6.3 se detallan los valores de repetibilidad obtenidos para cada sesión junto a la variación porcentual que sufren al agregar o quitar a AGGO.

Recordemos que las sesiones con la letra “a” son análogas a las de la letra “b” pero las primeras incluyen a la estación AGGO, por lo tanto es lógico ver en ellas que la cantidad de observaciones aumenta considerablemente debido a la presencia de una antena más.

La sesión 0, que es aquella con la red actual de estaciones VGOS, da valores de repetibilidad superiores que las demás sesiones. La principal causa es la mala distribución de antenas, debido a que solo se encuentran en el hemisferio norte.

Luego, si se comparan las sesiones “a” y “b” entre sí, podemos notar que las sesiones que incluyen a AGGO arrojan valores de repetibilidad menores que aquellas que no la involucran.

Por otra parte, comparando la sesión 1a con la 2a, los menores valores de repetibilidad se dan para la segunda sesión, ya que la única diferencia con la primera es que cuenta con una estación más en el hemisferio norte (MACGO12M) lo que aporta una mejor geometría norte-sur. Esta misma justificación puede ser usada en la comparación entre la sesión 1a y 3a, pero en este caso la antena adicionada es una en la provincia de Tierra del Fuego, DESPVG. Aparte de esto, podemos notar que la adición de DESPVG en el hemisferio sur brinda valores de repetibilidad menores en todos los EOP, excepto en UT1-UTC, que cuando se adiciona MACGO12M en el hemisferio norte. Esto puede venir

Sesión	Observaciones	xp [ $\mu sa$ ]	yp [ $\mu sa$ ]
0	27719	65,9141	70,9001
1a	13267(44,71 %)	16,1927(-52,03 %)	18,8201(-38,84 %)
1b	9168	33,7556	30,7702
2a	17266(34,25 %)	15,9739(-43,60 %)	17,6118(-27,32 %)
2b	12861	28,324	24,2312
3a	16850(26,44 %)	14,1878(-9,68 %)	17,2847(-8,22 %)
3b	13326	15,7089	18,8325

Sesión	UT1-UTC [ $\mu s$ ]	dX [ $\mu sa$ ]	dY [ $\mu sa$ ]
0	1,5707	34,7411	35,2126
1a	1,1432(-28,53 %)	15,1891(-33,44 %)	15,8752(-26,23 %)
1b	1,5995	22,8216	21,5199
2a	1,0116(-6,02 %)	14,342(-28,69 %)	14,6172(-25,34 %)
2b	1,0764	20,1125	19,5782
3a	1,108(-4,51 %)	13,8679(-12,23 %)	13,9711(-14,67 %)
3b	1,1603	15,8001	16,3737

**Tabla 6.3:** Repetibilidad y cantidad de observaciones por sesión simulada.

dado a que la existencia de DESPVG contribuye a una mejor distribución de antenas, porque en el hemisferio sur la cantidad inicial de estas es menor que en el Norte (ver mapas de la figura 6.3).

Al comparar las sesiones 1a y 3b, quienes poseen geometrías similares excepto que una red cuenta con AGGO y la otra con DESPVG (distantes 2260 *km* aproximadamente), podemos notar que los valores menores de repetibilidad se dan para la sesión con AGGO en todos los EOP excepto en xp por una diferencia de 0,5  $\mu sa$ .

En la tabla 6.3, entre paréntesis, también se muestra la variación porcentual de la repetibilidad para cada parámetro, al agregar la estación AGGO en cada configuración. Entonces, considerando las sesiones 1a y 1b, y 2a y 2b, cuando se le agrega AGGO, en términos de variaciones porcentuales, el parámetro más afectado en función de su repetibilidad es xp. En cambio para la 3a y 3b, los EOP más afectados son dX y dY. Es decir, las coordenadas del polo en ITRS son las poseen un mejoramiento más notable al agregarse AGGO en las sesiones 1b y 2b, pero en el caso de la 3 son las desviaciones de las coordenadas del CIP en GCRS.

Por otra parte, también podemos notar que la tendencia general de estas variaciones son mayores para todos los parámetros en la primera sesión, luego en la segunda y por último en la tercera. La variación debe ser la más baja en esta última porque si se remueve a AGGO, aun queda la antena de Tierra del Fuego quien puede realizar líneas de base muy parecidas a ella por ser muy cercanas.

Por otro lado, cabe destacar la diferencia entre los errores presentados en la tabla 6.4 en comparación con los errores “reales” presentados en la figura 5.4 del capítulo 5. Estos últimos, calculados a partir de una red global de antenas mayormente Legacy, en comparación con los primeros, que son resultado de observaciones con antenas solo VGOS, presentan un orden de magnitud mayor. Aún cuando AGGO no está presente, si bien los errores con las antenas VGOS se aproximan más a los calculados con las Legacy, los errores siguen siendo más bajos.

Sesión	Observaciones	xp [ $\mu$ sa]	yp [ $\mu$ sa]
0	27719	29,3808	28,5971
1a	13267	8,8726	9,8182
1b	9168	21,5980	18,3830
2a	17266	8,2338	8,8452
2b	12861	15,4346	12,4211
3a	16850	6,9845	8,5383
3b	13326	8,2958	9,8849

Sesión	UT1-UTC [ $\mu$ s]	dX [ $\mu$ sa]	dY [ $\mu$ sa]
0	0,7134	15,9616	15,3896
1a	0,6092	7,7869	8,0826
1b	1,0116	13,8242	13,7673
2a	0,5448	7,1956	7,3070
2b	0,5973	10,6323	10,7429
3a	0,5894	6,8581	7,0309
3b	0,6312	7,8282	8,1082

**Tabla 6.4:** Errores medios y cantidad de observaciones por sesión simulada.

En conclusión, las antenas propuestas en el hemisferio sur como VGOS, por temas de configuración de la red, hacen que la repetibilidad en los parámetros estimados sea menor cuando se las agrega. Sin embargo, si agregamos dos antenas son muy cercanas entre sí, como en el caso de AGGO yDESPVG, la ventaja no es tanto por la disminución de los valores de repetibilidad, sino más bien porque al agregar una segunda antena, ambas podrían apoyarse mutuamente en el caso de que una de ellas no pueda realizar ninguna observación.

Lo resultados, indican que:

- como es de esperar, una mejor geometría, mejora sensiblemente la calidad de las estimación de los parámetros,
- la existencia de AGGO en el contexto VGOS no es despreciable, más aún, es necesaria y aconsejable. Esta contribuiría a mejorar la estimación de todos los EOP en virtud de los resultados presentados sobre la simulación de sus estimaciones.
- sumar más estaciones en el hemisferio sur no sólo aumentaría la precisión de la estimación sino que también fortalecería la red en caso de imposibilidad de uso de una de las antenas.

## Capítulo 7

# Conclusión y perspectivas

Durante el desarrollo de este trabajo hemos visto que la técnica de geodesia espacial, VLBI, juega un rol muy importante en la realización del ICRS, cuya función es esencial para llevar a cabo diferentes trabajos de astrometría y geodesia. Además de su aporte fundamental en la materialización del ICRF, VLBI es la única técnica que permite estimar todos los parámetros de orientación terrestre necesarios para vincular ICRS con ITRF, jugando un rol primordial en la determinación de UT1-UTC y de los offset del polo celeste. Por otra parte, la técnica también es capaz de realizar un aporte considerable a la realización de ITRF.

El VLBI geodésico incluye varias etapas de complejos procedimientos desde la programación de las observaciones hasta la obtención de los diferentes parámetros, lo que involucra el estudio y conocimiento de distintos fenómenos que alteran la precisión de las coordenadas estimadas de las radiofuentes y de las estaciones, incluyendo desde aquellos que involucran a la geometría las antenas y su red, hasta los modelos que describen el comportamiento terrestre. No olvidemos el desafío tecnológico de la ingeniería involucrada en el desarrollo de la técnica.

VLBI está en constante desarrollo con el objetivo de aumentar la sensibilidad de su funcionamiento a tal punto de que con el pasar del tiempo se van dejando atrás los equipos Legacy para dar lugar a la nueva tecnología VGOS.

Como mencionamos en el trabajo, la distribución de antenas no es homogénea en todo el globo, habiendo una menor cantidad en el hemisferio sur que en el norte, y asimismo, el número de ellas en Sudamérica es menor que en Oceanía y el sur de África. Además, y como es de esperar, la mayor cantidad de antenas VGOS actualmente activas se encuentran en el hemisferio norte, lo que hace pensar que es necesario avanzar con el desarrollo de la técnica en la región.

Como parte de esta tesis no sólo hemos analizado y estudiado un gran número de sesiones R1 y R4 del IVS, sino que hemos creado schedules y simulado varias sesiones con el fin de llevar a cabo análisis sobre la influencia de la geometría en los EOP.

En el capítulo 4, hemos analizado las estimaciones de EOP hechas por el IGN (centro de análisis asociado del IVS) y sus diferencias con el IERS, exponiendo que sus soluciones diarias no sólo muestran la calidad esperada, sino que son comparables con las de otros centros que utilizan diferentes softwares de análisis.

Luego, en el capítulo 5, se estudió la influencia que tuvieron AGGO y TIGO sobre la estimación de los EOP. En el caso de los parámetros UT1-UTC,  $dX$  y  $dY$ , durante el período denominado “Con AGGO” la precisión en su estimación fue mayor que en épocas pasadas consideradas, inclusive cuando estuvo TIGO. En cambio, durante el período de transición en el que ninguna de las dos estaciones estuvo presente, la precisión alcanzada para  $x_p$  e  $y_p$  fue la mayor. Pero, de todas formas, para todos los EOP determinados a partir de la existencia de AGGO, su estimación fue mejor que entre 2012

y 2014 (período “Con TIGO”). Diferentes factores pudieron haber contribuido con estas diferencias. Como vimos, la precisión obtenida en el análisis de los datos, muestra una mejora frente al aumento de la cantidad de observaciones o de líneas de base, tanto con orientación norte-sur como este-oeste. La homogeneidad, como la hemos considerado en esta tesis, solo afecta a la determinación de  $x_p$  e  $y_p$ . Por lo tanto, lo que uno puede pensar es que las mejoras que se ven período tras período no son únicamente debidas al paso de TIGO a AGGO, si no que pueden deberse también a un aumento en el número de estaciones.

Si bien se aprecia una diferencia entre el período “Con AGGO” y “Con TIGO”, se desprende del análisis hecho que el impacto de AGGO como Legacy no es tan significativo siendo que, además, en virtud de la mudanza a VGOS por parte de estaciones australianas, y otras del hemisferio norte, se seguirán perdiendo líneas de base que involucren a AGGO, y que como producto de lo que analizamos, esto aportará a una estimación menos precisa de los EOP.

No obstante, en el último capítulo se analizaron posibles configuraciones alternativas de la red de estaciones VGOS a la actual, para ver si éstas mejoraban la estimación de los parámetros. Hemos mostrado que el panorama podría ser distinto no sólo si las 9 estaciones VGOS presentes hubieran estado mejor distribuidas desde el inicio, sino, vimos que si AGGO tuviera esta nueva tecnología realizaría un aporte más significativo en el contexto global y que mucho mejor aún sería contar con otras estaciones en particular, hacia el sur del país. Esto fue probado mediante el planteo de distintos schedules y sus posteriores simulaciones con VieSched++.

Todos los estudios aquí realizados son mejorables, en particular la determinación de calidad de las sesiones analizadas por el IGN podrían realizarse en un futuro a partir soluciones globales provistas por dicha institución, lo que permitiría refinar las estimaciones. Esta es una etapa pendiente, incluso para el IGN como centro asociado, pero que depende también de avanzar con el análisis de sesiones hacia los inicios de la técnica.

Por otra parte, se podría estudiar la influencia de otros factores sobre la determinación de los EOP en las épocas estudiadas más allá de los que hemos considerado en esta tesis. Por ejemplo, otros trabajos han estudiado a los desvíos en función del volumen del poliedro que forman las antenas como vértices. También, se podría estudiar cuál es el comportamiento de la precisión de la estimación según la distribución de radiofuentes.

En cuanto a la simulación, sería posible variar el número de estaciones al mismo tiempo que incorporar otros parámetros cuyos pesos variables permitirían obtener otras soluciones con el objetivo de confirmar la tendencia obtenida en este trabajo. Otro estudio interesante de realizar sería buscar las posiciones más óptimas en Sudamérica en dónde colocar antenas VGOS, o simplemente, VLBI.

Este trabajo de tesis pretende evidenciar la necesidad de no solamente contar con estaciones en el hemisferio sur, en particular estaciones como AGGO en Sudamérica, sino también la de contar con la última tecnología. Por supuesto, eso implica fomentar el interés por la técnica en la región para aumentar el número de expertos en ella.

Dentro de Argentina se encuentran los recursos necesarios para operar VLBI, si así se lo requiriese, y una gran cantidad de instituciones en las que son posibles formar profesionales con orientación a las técnicas geodésicas espaciales con el objetivo de llevar a cabo y apoyar al desarrollo tecnológico de VLBI.

# Apéndice A

## Sesiones seleccionadas

Con TIGO	Sin nada	Con AGGO
12JUL09XA	14JUN23XA	19JAN14XA
12JUL16XA	14JUL31XE	19FEB11XA
12JUL30XA	14AUG18XA	19APR04XE
12AUG16XE	14OCT01XE	19APR08XA
12AUG20XA	14OCT20XA	19APR15XA
12AUG27XA	14NOV25XE	19APR23XA
12SEP04XA	15JAN15XE	19MAY07XA
12SEP10XA	15JAN20XA	19MAY13XA
12SEP24XA	15FEB16XA	19MAY20XA
12OCT11XE	15MAR26XE	19JUN03XA
12OCT15XA	15APR23XE	19JUN11XA
12NOV26XA	15MAY21XE	19JUL01XA
12DEC03XA	15JUN09XA	19JUL15XA
12DEC10XA	15JUL01XE	19JUL29XA
12DEC18XA	15AUG11XA	19AUG05XA
12DEC20XE	15SEP21XA	19AUG12XA
12DEC27XE	15OCT13XA	19AUG26XA
13FEB14XE	15NOV16XA	19SEP02XA
13APR02XA	15DEC17XE	19SEP16XA
13APR18XE	16JAN26XA	19SEP23XA
13JUN20XE	16FEB04XE	19OCT21XA
13JUN24XA	16MAR07XA	19OCT28XA
13JUN27XE	16APR11XA	19NOV04XA
13JUL01XA	16MAY17XA	19NOV21XE
13JUL02XE	16JUN13XA	20JAN13XA
13AUG08XE	16JUL25XA	20JAN27XA
13AUG22XE	16AUG29XA	20FEB03XA
13SEP26XE	16SEP08XE	20FEB10XA
13OCT07XA	16OCT31XA	20MAR02XA
13OCT10XE	16NOV07XA	20MAR09XA
13OCT15XA	16DEC01XE	20MAR16XA
13OCT21XA	17JAN03XA	20JUN22XA
13OCT28XA	17FEB02XE	20JUN29XA
13NOV05XA	17MAR13XA	20JUL06XA
13NOV07XE	17APR12XE	20JUL13XA
13NOV12XA	17MAY11XE	20JUL20XA
13NOV14XE	17JUN29XE	20AUG18XA
13NOV21XE	17JUL20XE	20AUG24XA
13NOV25XA	17AUG10XE	20AUG31XA

13DEC05XE	17SEP21XE	20SEP08XA
13DEC12XE	17OCT23XA	20SEP14XA
13DEC16XA	17NOV21XE	20SEP28XA
13DEC19XE	18JAN11XE	20NOV09XA
14JAN21XA	18JAN18XE	20NOV24XA
14FEB03XA	18FEB26XA	
14FEB10XA	18MAR19XA	
14MAR31XA	18APR05XE	
14APR03XE	18MAY14XA	
14APR10XE	18JUN21XE	
14MAY27XA		

**Tabla A.1:** Sesiones seleccionadas por período.

## Apéndice B

# Estimación de la media y de la desviación estándar para diferencias de variables.

Si tenemos tres variables discretas en función del tiempo,  $a_i$ ,  $b_i$  y  $c_i$ , con  $i = 1, 2, \dots, N$ , donde todos los elementos con el mismo subíndice se encuentran en la misma época. El valor medio de la diferencia entre  $a_i$  y  $c_i$ , viene dado por la expresión B.0.1 ,y entre  $b_i$  y  $c_i$  por la expresión B.0.2.

$$\mu_{ac} = \frac{\sum_{i=1}^N a_i - c_i}{N} \quad (\text{B.0.1})$$

$$\mu_{bc} = \frac{\sum_{i=1}^N b_i - c_i}{N} \quad (\text{B.0.2})$$

Por lo tanto, la media entre  $a_i$  y  $b_i$  será:

$$\begin{aligned} \mu_{ab} &= \frac{\sum_{i=1}^N a_i - b_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - c_i) - (b_i - c_i)}{N} \\ \mu_{ab} &= \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - c_i)}{N} - \frac{\sum_{i=1}^N (b_i - c_i)}{N} \\ \mu_{ab} &= \mu_{ac} - \mu_{bc} \end{aligned} \quad (\text{B.0.3})$$

Por otro lado, la varianza de la diferencia entre  $a_i$  y  $c_i$ , viene dado por la expresión B.0.4 ,y entre  $b_i$  y  $c_i$  por la expresión B.0.5.

$$\sigma_{ac}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(a_i - c_i) - \mu_{ac}]^2}{N - 1} \quad (\text{B.0.4})$$

$$\sigma_{bc}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(b_i - c_i) - \mu_{bc}]^2}{N - 1} \quad (\text{B.0.5})$$

Y por lo tanto, la varianza entre  $a_i$  y  $b_i$  será:

$$\begin{aligned} \sigma_{ab}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^N [(a_i - b_i) - \mu_{ab}]^2}{N - 1} \\ \sigma_{ab}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^N [(a_i - b_i) - \mu_{ac} + \mu_{bc}]^2}{N - 1} \\ \sigma_{ab}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - c_i - b_i + c_i - \mu_{ac} + \mu_{bc})^2}{N - 1} \\ \sigma_{ab}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^N \{[(a_i - c_i) - \mu_{ac}] - [(b_i - c_i) - \mu_{bc}]\}^2}{N - 1} \end{aligned} \quad (\text{B.0.6})$$

Luego, si desarrollamos el binomio dentro de la sumatoria y tenemos en cuenta las expresiones B.0.4 y B.0.5, obtenemos:

$$\begin{aligned}\sigma_{ab}^2 &= \sigma_{ac}^2 + \sigma_{bc}^2 - 2 \frac{\sum_{i=1}^N [(a_i - c_i) - \mu_{ac}] [(b_i - c_i) - \mu_{bc}]}{N - 1} \\ \sigma_{ab}^2 &= \sigma_{ac}^2 + \sigma_{bc}^2 - 2COV [(a_i - c_i), (b_i - c_i)]\end{aligned}\quad (\text{B.0.7})$$

donde  $COV [n, m]$  hace referencia a la operación de covarianza entre las variables  $n$  y  $m$ . Y la desviación estándar será,

$$\sigma_{ab} = \sqrt{\sigma_{ac}^2 + \sigma_{bc}^2 - 2 \frac{\sum_{i=1}^N [(a_i - c_i) - \mu_{ac}] [(b_i - c_i) - \mu_{bc}]}{N - 1}}\quad (\text{B.0.8})$$

Ahora nos preguntamos ¿qué pasa si las épocas de  $a_i$  no coinciden con las épocas de  $b_i$ , aunque si contemos con  $c_i$  para todas las épocas?

En el caso de la media, podremos decir que la resta de las medias de las diferencias entre  $a_i$  y  $b_i$  con  $c_i$  es representativo de  $\mu_{ab}$  ya que  $\mu_{ac}$  y  $\mu_{bc}$  pueden ser tomados como equivalentes de a cualquier media calculada con épocas diferentes a las consideradas inicialmente.

En cambio, para  $\sigma_{ab}$  esto no se da de la misma forma. Tanto a  $\sigma_{ac}^2$  y a  $\sigma_{bc}^2$  los podemos tomar como representativo de las diferencias mas allá de que cambiemos las épocas con la que hacemos los cálculos. Sin embargo, a  $COV [(a_i - c_i), (b_i - c_i)]$  no lo podemos considerar de esta manera porque parte de su cómputo implica la multiplicación de dos factores que se encuentran en diferentes tiempos. Por lo que si suponemos que la diferencia que estimamos entre  $b_i$  y  $c_i$  se encuentran en la misma época que cada  $a_i$ , estaremos introduciendo un error en el factor  $(b_i - c_i)$  igual a  $dB_j = (b_k - c_k) - (b_j - c_j)$ , donde  $k$  son los índices que indican las épocas de  $a_k$  y  $j$  los de las épocas de  $b_j$ .

Por propagación de errores y llamando a  $(b_j - c_j)$  como  $diff_j$ , el error en la desviación estándar será,

$$d\sigma_{ab} = \sum_{j=1}^N \left| \frac{\partial \sigma_{ab}}{\partial diff_j} \right| dB_j\quad (\text{B.0.9})$$

Si derivamos,

$$d\sigma_{ab} = \frac{\sum_{j=1}^N |(a_j - c_j) - \mu_{ac}| dB_j}{(N - 1)\sigma_{ab}^2}\quad (\text{B.0.10})$$

Ahora para saber cuanto es el error que puedo tener como máximo en cada  $dB_j$  para que  $d\sigma_{ab} < d\sigma_{ab}^*$ , que todos los  $dB_j = dB$  para hallar una cota constante. Entonces,

$$|d\sigma_{ab}| = \left| \frac{\sum_{j=1}^N |(a_j - c_j) - \mu_{ac}| dB_j}{(N - 1)\sigma_{ab}^2} \right| < \frac{\sum_{j=1}^N |(a_j - c_j) - \mu_{ac}|}{(N - 1)\sigma_{ab}^2} |dB| = d\sigma_{ab}^*\quad (\text{B.0.11})$$

Averiguemos cuanto debe valer  $|dB|$  para que la cota sea  $d\sigma_{ab}^*$  despejando la ecuación B.0.11

$$|dB| = \frac{(N-1)\sigma_{ab}^2}{\sum_{j=1}^N |(a_j - c_j) - \mu_{ac}|} d\sigma_{ab}^* \quad (\text{B.0.12})$$

# Siglas

*GHz* Gigahertz. 38

*μm* micrometro. 26

*μs* microsegundos. 6

*μsa* microsegundos de arco. 89

$\varepsilon_r^{\log}(\omega_n)$  Energía logarítmica de un conjunto,  $\omega_n$ , de  $n$  antenas. 77

$\|\cdot\|$  Norma. 77

*ps* picosegundos. 27

*s* segundos. 5, 9

**AGGO** Argentine-German Geodetic Observatory. 1, 2, 35, 44, 57, 58, 63, 69, 76, 77, 81, 82, 84–86, 88–92

**BCRS** Barycentric Celestial Reference System. 9, 22

**BIH** Bureau International de l'Heure. 5, 98

**BKG** Very Long Baseline Array Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. 35, 43–46, 52, 53, 56

**BTS87** BIH Terrestrial System 1987. 5

**CDDIS** Crustal Dynamics Information Data System. 41, 43

**CIGA** Centro de Investigaciones en Geodesia Aplicada. 35

**CIO** Celestial Intermediate Origin. 9, 12, 39

**CIP** Celestial Intermediate Pole. 9–12, 38, 41, 89, 99, 102

**CIRS** Celestial Intermediate Reference System. 9, 11

**cm** centímetro. 26, 27, 53

**CONICET** Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. 35

**CONT** Campaña de observación VLBI continua. 16

**CPC-Ar** Centro de Procesamiento Científico de Datos GNSS de Argentina. 35

**CTRS** Conventional Terrestrial Reference System. 4, 5

**DESPVG** Antena VGOS Despedida. 88–90

**DOGS-RI** DGFI Orbit and Geodetic Parameter Estimation Software for Radio Interferometry. 36

**DORIS** Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite. 4, 5, 33, 38, 99

**DSNX** Daily Solution SINEX. 36

**dX** Apartamiento que posee la coordenada X del CIP en el GCRS con respecto a un modelo de precesión y nutación. 10, 41, 45, 46, 52, 54, 55, 60, 61, 63, 65, 70, 72–76, 80, 82, 89, 91

**dY** Apartamiento que posee la coordenada Y del CIP en el GCRS con respecto a un modelo de precesión y nutación. 10, 41, 45, 46, 52, 54, 55, 60, 61, 63, 65, 70, 72–76, 80, 82, 89, 91

**E** Este. 69, 70, 72, 73, 76, 80–82

**ECM** Error Cuadrático Medio. 68, 72, 73, 75, 76, 79, 80, 82, 83

**ENOS** El Niño- Oscilación del Sur. 6

**EOP** Earth Orientation Parameter. 1, 2, 5, 8, 11, 13, 16, 19, 22, 26, 31–33, 37, 38, 40, 42–44, 52–54, 56–58, 60, 62, 65, 66, 68–70, 72–76, 78–80, 82–84, 87–92

**ERA** Earth Rotation Angle. 9, 11

**FCN** FFree Core Nutation. 9, 40, 41, 55

**FES** Finite Elements Solution. 40

**GCRS** Geocentric Celestial Reference System. 9–12, 22, 89, 99

**GFZ** GeoForschungsZentrum. 43–46, 52–54, 56

**GLORIA** Global Radio Interferometric Analysis. 36

**GNSS** Global navigation satellite system. 4, 5, 33, 35, 38, 52, 98, 100

**GRS** Geocentric Reference System. 4

**GSFC** Goddard Space Flight Center. 16, 40, 41

**GSI** Geospatial Information Authority. 32, 45

**GTRS** Geocentric Terrestrial Reference System. 5

**h** hora. 5

**HART15M** Hartebeesthoek 15m. 77

**IAU** International Astronomical Union. 4, 8, 9, 38–41, 43, 55, 56

**ICRF** International Celestial Reference Frame. 5, 16, 32, 38, 41, 53, 57, 85, 91

**ICRS** International Celestial Reference System. 1, 4, 5, 9, 32, 38, 91

**IDS** International DORIS Service. 33

**IERS** International Earth Rotation and Reference Systems Service. 4, 32, 33, 36–40, 42, 44–46, 52, 53, 56, 59, 62, 91

**IGN** Instituto Geográfico Nacional. 2, 20, 34–40, 42–46, 52–54, 56, 57, 91, 92

**IGS** International GNSS Service. 33

**ILRS** International Laser Ranging Service. 33, 38

**ITRF** International Terrestrial Reference Frame. 1, 4, 5, 16, 19, 32, 37, 38, 43, 53, 57, 91

**ITRS** International Terrestrial Reference System. 5, 9, 11, 32, 89, 102

**IUGG** International Union of Geodesy and Geophysics. 4

**IVS** International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. 2, 19, 20, 33, 35–37, 42, 43, 52, 56–58, 69, 73, 91

**J** Julian Date. 4, 40

**JPL** Jet Propulsion Laboratory. 41

**KATH12M** Katherine. 82

**km** Kilometro. 69, 73

**LLR** Lunar Laser Ranging. 4, 33, 41

**LOD** Length Of Day. 5, 6

**m** metro. 27, 35

**MACGO12M** McDonald 12m. 88

**MHz** Megahertz. 27

**min** minuto. 5

**mm** milímetro. 27

**MODEST** Daily Solution SINEX. 36

**ms** milisegundos. 6, 45, 54, 60, 61

**msa** milisegundo de arco. 26, 38, 45, 46, 54, 60–63

**N** Norte. 73, 74, 76, 80–82

**NASA** National Aeronautics and Space Administration. 16, 41

**NCEP** National Center for Environmental Prediction. 40

**NDFW** Nearly Diurnal Free Wobble. 55

**NetCDF** Network Common Data Form. 17

**NMA** Norwegian Mapping Authority. 43–46, 52–54, 56

**NNR** No Net Rotation. 31

**NNT** No Net Translation. 31

**O** Oeste. 69, 70, 72, 73, 76, 80–82

**OAFA** Observatorio Astronómico Félix Aguilar. 35

**OCCAM** Daily Solution SINEX. 36

**ONU** Organización de las Naciones Unidas. 4

**PORT** Potsdam Open Source Radio Interferometry Tool. 36

**POSGAR07** Posiciones Geodésicas Argentinas 2007. 34, 35

**R1** Rapid Turnaround 1. 1, 16, 52, 57, 58, 84, 87, 91

**R4** Rapid Turnaround 4. 1, 16, 52, 57, 58, 84, 87, 91

**rad** radianes. 5

**RAMSAC** Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo. 34

**S** Sur. 73, 74, 76, 80–82

**SEFD** System Equivalent Flux Density. 15

**SI** Sistema Internacional de Unidades. 5, 6

**SINEX** Software Independant Exchange. 31, 36, 43–45, 58, 99–101

**SIRGAS** Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. 35

**SKED** VLBI Scheduling Software. 16

**SLR** Stellite Laser Ranging. 4, 5, 33, 35, 36, 38

**SNR** Signal Noise Ratio. 17, 18

**TAI** Tiempo Atómico Internacional. 9, 22

**TCB** Tiempo Coordinado Baricéntrico. 23

**TCG** Tiempo Coordinado Geocéntrico. 23

**TIGO** The Transportable Integrated Geodetic Observatory. 1, 2, 35, 57, 63, 77, 81, 82, 84, 91, 92

**TIO** Terrestrial Intermediate Origin. 9, 11

**TIRS** Terrestrial Intermediate Origin. 9, 11

**TT** Terrestrial Time. 22, 23

**UT1** Universal Time 1. 6, 9, 16, 33, 39, 44–46, 52, 54, 60, 62, 63, 65, 69, 73, 80–83, 88, 91

**UTC** Coordinated Universal Time. 9, 22, 44–46, 52, 54, 60, 62, 63, 65, 69, 73, 80–83, 88, 91

**VGOS** VLBI Global Observing System. 1, 2, 18, 27, 72, 76, 82, 84–86, 88–92, 99

**VgosDB** Database for the VLBI Global Observing System. 2, 17, 36, 42

**VieSched++** VieVS VLBI Scheduling Software. 2, 84, 85, 92

**VieVS** Vienna VLBI and Satellite Software. 2, 36, 42, 44, 45, 60, 102

**VLBA** Very Long Baseline Array. 34

**VLBI** Very Long Baseline Interferometry. 1, 2, 4–6, 13, 16–20, 26–28, 30, 33–36, 38, 39, 42, 43, 52, 55, 57, 63, 91, 92, 98, 100–102

**VMF** Vienna Mapping Function. 41

**xp** Coordenada X del CIP en el ITRS. 11, 39, 44–46, 52, 54, 60–63, 65, 73, 76, 80, 82, 83, 89, 91, 92

**yp** Coordenada Y del CIP en el ITRS. 11, 39, 44, 45, 52, 54, 56, 60–63, 65, 73, 76, 80, 82, 83, 91, 92

**yr** año. 38

# Referencias

- Abbondanza, C. y Sarti, P. (2010). Effects of illumination functions on the computation of gravity-dependent signal path variation models in primary focus and cassegrainian vlbi telescopes. Journal of Geodesy, 84:515–525.
- Agnew, D. C. (2007). 3.06 earth tides. Treatise on geophysics, pp. 163–195.
- Altamimi, Z., Boucher, C., y Gambis, D. (2005). Long-term stability of the terrestrial reference frame. Advances in space research, 36(3):342–349.
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., y Collilieux, X. (2016). Itrf2014: A new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(8):6109–6131.
- Arias, E. F., Charlot, P., Feissel, M., y Lestrade, J.-F. (1995). The extragalactic reference system of the international earth rotation service, icrs. Astronomy and Astrophysics, 303:604–608.
- Asamblea General de las Naciones Unidas (2015). Resolución a/res/69/266.
- Bangert, J., Bell, S., Calabretta, M., Capitaine, N., Folkner, W., Hohenkerk, C., Li, J., Luzum, B., Malkin, Z., y Percival, J. y o. (2017). Sofa time scales and calendar tools. Technical report, Technical Report.
- Beltrán Álvarez, C. y o. (2020). Sobre el problema número 7 de smale.
- Bertarini, A., Roy, A. L., Corey, B., Walker, R. C., Alef, W., y Nothnagel, A. (2011). Effects on geodetic vlbi measurements due to polarization leakage in s/x receivers. Journal of Geodesy, 85(10):715–721.
- Bizouard, C., Lambert, S., Becker, O., y Richard, J. Y. (2017). Combined solution c04 for earth rotation parameters consistent with international terrestrial reference frame 2014. IERS Notice. Available online: <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc04 C, 4>.
- Böhm, J., Böhm, S., Boisits, J., Girdiuk, A., Gruber, J., Hellerschmied, A., Krásná, H., Landskron, D., Madzak, M., Mayer, D., McCallum, J., McCallum, L., Schartner, M., y Teke, K. (2018). Vienna vlbi and satellite software (vies) for geodesy and astrometry. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 130(986):044503.
- Böhm, J., Böhm, S., Hellerschmied, A., Hofmeister, A., Krásná, H., Madzak, M., y Mayer, D. (2014). User manual of the Vienna VLBI Software VieVS Version 2.2.
- Brzeziński, A. y Petrov, S. (1999). Observational evidence of the free core nutation and its geophysical excitation. Journées 1998-Systèmes de Référence Spatio-Temporels: Conceptual, Conventional and Practical Studies Related to Earth Rotation, pp. 169–174.
- Capitaine, N. (2000). New parameters for the orientation of the earth in the icrs.

- Capitaine, N. (2009). Models and nomenclature in earth rotation. Proceedings of the International Astronomical Union, 5(S261):69–78.
- Capitaine, N., Andrei, A., Calabretta, M., Dehant, V., Fukushima, T., Guinot, B., Hohenkerk, C., Kaplan, G., Kovalevsky, J., y Kunkova, I. y. o. (2005). Division I Working Group on “Nomenclature for Fundamental Astronomy”(NFA). Proceedings of the International Astronomical Union, 1(T26A):59–62.
- Capitaine, N., Guinot, B., y McCarthy, D. D. (2000). Definition of the celestial ephemeris origin and of ut1 in the international celestial reference frame. Astronomy and Astrophysics, 355:398–405.
- Capitaine, N. y Wallace, P. T. (2006). High precision methods for locating the celestial intermediate pole and origin. Astronomy & Astrophysics, 450(2):855–872.
- Capitaine, N., Wallace, P. T., y Chapront, J. (2003). Expressions for IAU 2000 precession quantities. Astronomy & Astrophysics, 412(2):567–586.
- Charlot, P., Jacobs, C. S., Gordon, D., Lambert, S., de Witt, A., Böhm, J., Fey, A. L., Heinkelmann, R., Skurikhina, E., Titov, O., Arias, E. F., Bolotin, S., Bourda, G., Ma, C., Malkin, Z., Nothnagel, A., Mayer, D., MacMillan, D. S., Nilsson, T., y Gaume, R. (2020). The third realization of the international celestial reference frame by very long baseline interferometry. A&A, 644:A159.
- Chen, G. y Herring, T. (1997). Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B9):20489–20502.
- Clark, T. y Thomsen, P. (1988). Deformations in VLBI antennas. Technical report.
- Davis, J., Herring, T., Shapiro, I., Rogers, A., y Elgered, G. (1986). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. Radio Science, 20.
- de Witt, A., Charlot, P., Gordon, D., y Jacobs, C. S. (2022). Overview and status of the international celestial reference frame as realized by vlbi. Universe, 8(7):374.
- Dehant, V., de Viron, O., y Barriot, J.-P. (2005). Geophysical excitation of the earth orientation parameters eop and its contribution to ggos. Journal of Geodynamics, 40(4-5):394–399.
- Desai, S. D. (2002). Observing the pole tide with satellite altimetry. Journal of Geophysical Research: Oceans, 107(C11):7–1.
- Egbert, G. D. y Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. Journal of Atmospheric and Oceanic technology, 19(2):183–204.
- Elgered, G. (1982). Tropospheric wet path-delay measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 30(3):502–505.
- Feissel, M. y Mignard, F. (1998). The adoption of icrs on 1 january 1998: meaning and consequences. Astronomy and Astrophysics, 331:L33–L36.
- Folkner, W. M., Williams, J. G., y Boggs, D. H. (2009). The planetary and lunar ephemeris de 421. IPN progress report, 42(178):1.
- Gambis, D. y Bizouard, C. (2003). Consistency analysis between eop series and reference frames. En Proceedings of the IERS Workshop on Combination Research and Global Geophysical Fluids, IERS Technical Note, volumen 30, pp. 57–62.
- Gipson, J. (2016). Sked vlbi scheduling software. goddard space flight center.

- Gipson, J. (2021). vgosDB Manual.
- Girdiuk, A., Schindelegger, M., y Böhm, J. (2016). Tidal atmospheric loading and vlbi. STAGNI, Matteo; NEGUSINI, MONIA; Bianco, Giuseppe; SARTI, PIERGUIDO, p. 346.
- Gomez, M. y Fernández, L. (2022). Impacto de una mejor distribución de estaciones en las sesiones de vlbi geodésico. Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina, 63:290–292.
- Gomez, M. E. y Fernández, L. I. (2022). Impacto de una mejor distribución de estaciones en las sesiones de VLBI geodésico. Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina, 63:290–292.
- Haas, R., Nothnagel, A., Schuh, H., y Titov, O. (1999). Explanatory supplement to the section 'Antenna Deformation' of the IERS Conventions (1996). DGFI report, (71):26–29.
- Hase, H. (2010). Zur bedeutung von tigo zur bestimmung des itrf, der eop, eurf und gref. Technical report, Technical report.
- Hase, H. y Pedreros, F. (2014). The most remote point method for the site selection of the future ggos network. Journal of Geodesy, 88:989–1006.
- Hase, H. y Pedreros, F. (2014). The most remote point method for the site selection of the future GGOS network. Journal of Geodesy, 88:989–1006.
- Heinkelmann, R. (2013). Vlbi geodesy: Observations, analysis and results. En Jin, S., editor, Geodetic Sciences, capítulo 3. IntechOpen, Rijeka.
- Helmert, F. R. (1980). Mathematical and physical theories of higher geodesy. Geo-Sciences Branch, Chart Research Division, Aeronautical Chart and . . . .
- Herring, T. (1992). Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. Proceedings of Refraction of Transatmospheric signals in Geodesy, eds. JC De Munck and TA Spoelstra, Netherlands Geodetic Commission Publications on Geodesy, 36(4).
- Hohenkerk, C. (2005). Implementation of the new nomenclature in the astronomical almanac. SESSION II: MODELS FOR EARTH ROTATION: FROM POINCARÉ TO IAU 2000 43 Dehant V., de Viron O., Van Hoolst T.: Poincaré flow in the Earth's core..... 45 Capitaine N., Wallace PT: Improvements in the precession-nutation models..... 49 Hilton JL: Progress report of the International Astronomical Union Division I Work, p. 168.
- Kuipers, L. y Niederreiter, H. (2012). Uniform distribution of sequences. Courier Corporation.
- Lambert, S. (2007). Empirical modeling of the retrograde free core nutation. Technical Note, <ftp://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/fcn/notice.pdf>.
- Landskron, D. y Böhm, J. (2018a). Refined discrete and empirical horizontal gradients in vlbi analysis. Journal of Geodesy, 92:1387–1399.
- Landskron, D. y Böhm, J. (2018b). Vmf3/gpt3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. Journal of Geodesy, 92:349–360.
- Le Bail, K., Gipson, J., Juhl, J., y MacMillan, D. (2013). Optimal time lags to use in modeling the thermal deformation of vlbi antennas. En 21st Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy, pp. 165–168.

- Lefevre, F., Lyard, F., Le Provost, C., y Schrama, E. J. (2002). Fes99: a global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information. Journal of atmospheric and oceanic technology, 19(9):1345–1356.
- Luzum, B. y Gambis, D. (2014). Explanatory supplement to IERS bulleting A and bulletin B/C04. IERS, URL [ftp://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulb\\_new/bulletinb.pdf](ftp://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulb_new/bulletinb.pdf).
- MacMillan, D. y Ma, C. (1997). Atmospheric gradients and the vlbi terrestrial and celestial reference frames. Geophysical Research Letters, 24(4):453–456.
- Mathews, P., Buffett, B., y Shapiro, I. (1995). Love numbers for a rotating spheroidal earth. new definitions and numerical values. Geophysical Research Letters, 22(5):579–582.
- Mathews, P. M., Herring, T. A., y Buffett, B. A. (2002). Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid earth and insights into the earth's interior. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B4):ETG–3.
- Munk, W. H. y MacDonald, G. J. (1960). The rotation of the earth; a geophysical discussion. Cambridge [Eng.] University Press.
- Newton, I. (1687). Mathematical principles of natural philosophy.
- Nilsson, T., Bohm, J., y Schuh, H. (2010). Impacts of the 2010 chile earthquake on earth rotation. En AGU Spring Meeting, Foz do Iguau, Brazil.
- Nilsson, T., Haas, R., y Elgered, G. (2007). Simulations of atmospheric path delays using turbulence models. En Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Work Meeting, pp. 175–180.
- Nothnagel, A. (2009). Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric vlbi. Journal of Geodesy, 83(8):787–792.
- Nothnagel, A. (2023). Elements of Geodetic and Astrometric Very Long Baseline Interferometry. [https://www.vlbi.at/data/publications/Nothnagel\\_Elements\\_of\\_VLBI.pdf](https://www.vlbi.at/data/publications/Nothnagel_Elements_of_VLBI.pdf). Último acceso: marzo de 2023.
- Nothnagel, A., Artz, T., Behrend, D., y Malkin, Z. (2017). International vlbi service for geodesy and astrometry: Delivering high-quality products and embarking on observations of the next generation. Journal of Geodesy, 91(7):711–721.
- Nothnagel, A., Pilhatsch, M., y Haas, R. (1995). Investigations of thermal height changes of geodetic vlbi radio telescopes. En Proceedings of the 10th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, pp. 121–133. Agenzia Spaziale Ital. Matera.
- Pany, A., Böhm, J., Macmillan, D., Schuh, H., Nilsson, T., y Wresnik, J. (2010). Monte carlo simulations of the impact of troposphere, clock and measurement errors on the repeatability of vlbi positions. Journal of Geodesy, 85:39–50.
- Petit, G. y Luzum, B. e. (2010). IERS Conventions (2010).
- Petrov, L. (2000). Instrumental Errors of Geodetic VLBI. En Takahashi, F., editor, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting Proceedings, pp. 230–235.
- Ray, R. D., Steinberg, D. J., Chao, B. F., y Cartwright, D. E. (1994). Diurnal and semidiurnal variations in the earth's rotation rate induced by oceanic tides. Science, 264(5160):830–832.

- Rodríguez, U. E. (2019). El problema de la distribución de puntos en la esfera. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria.
- Schartner, M. y Böhm, J. (2019a). Viesched++: a new vlbi scheduling software for geodesy and astrometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131(1002):084501.
- Schartner, M. y Böhm, J. (2019b). Viesched++: A new VLBI scheduling software for geodesy and astrometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131(1002):084501.
- Schartner, M., Böhm, J., y Nothnagel, A. (2020). Publications in scientific journals. *Earth Planets and Space*, 72(87):1–14.
- Schartner, M., Kern, L., Nothnagel, A., Böhm, J., y Soja, B. (2021). Optimal vlbi baseline geometry for ut1-utc intensive observations. *Journal of Geodesy*, 95(7):1–14.
- Schubert, S. D., Rood, R. B., y Pfaendtner, J. (1993). An assimilated dataset for earth science applications. *Bulletin of the American meteorological Society*, 74(12):2331–2342.
- Skurikhina, E. (2001). On computation of antenna thermal deformation in VLBI data processing. En 15th Workshop Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, volumen 15, p. 124.
- Souchay, J., Loysel, B., Kinoshita, H., y Folgueira, M. (1999). Corrections and new developments in rigid earth nutation theory-iii. final tablesren-2000including crossed-nutation and spin-orbit coupling effects. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 135(1):111–131.
- Sovers, O. J., Fanselow, J. L., y Jacobs, C. S. (1998). Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. *Reviews of Modern Physics*, 70(4):1393.
- Sparke, L. S. y Gallagher III, J. S. (2007). Galaxies in the universe: an introduction. Cambridge University Press.
- Takagi, Y. (2022). Technical description of solution gsi2022a. <https://www.spacegeodesy.go.jp/vlbi/solutions/gsi2022a/gsi2022a.trf.txt> . Último acceso: marzo de 2023.
- Thompson, A. R., Moran, J. M., y Swenson, G. W. (2017). Interferometry and synthesis in radio astronomy. Springer Nature.
- Torge, W. (2001). *Geodesy*.
- Whitney, A. R. (1974). Precision geodesy and astrometry via very-long-baseline interferometry. Tesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology.
- Whyte, L. (1952). Unique arrangements of points on a sphere. *The American Mathematical Monthly*, 59(9):606–611.
- Wresnik, J., Haas, R., Boehm, J., y Schuh, H. (2007). Modeling thermal deformation of vlbi antennas with a new temperature model. *Journal of Geodesy*, 81:423–431.
- XX Asamblea General de la Unión Internacional de Gofísicos y Geodestas (1991). CLOSING PLENARY SESSION, Resolución N°2.
- XXI Asamblea General de la IAU (1991). Recomendaciones del Grupo de Trabajo sobre Sistemas de Referencia, Resolución N°A4.
- XXIV Asamblea General de la IAU (2000). Definición y uso del origen de efemerides celeste y terrestre, Resolución N°B1.8.

XXIV Asamblea General de la IUGG (2007). Resoluciones adoptadas por el concejo en la xxiv asamblea general de la unión internacional de geofísica y geodesia.